

Bauliche Infektionspräventionsstrategie

Architekturwissenschaftliche Analyse, Bewertung und Lösungsstrategie zur
Kontrolle von Infektionsübertragungswegen in Gebäudesystemen

Von der
Fakultät Architektur, Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina
zu Braunschweig

zur Erlangung des Grades eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte

Dissertation

von
Jan Holzhausen
geboren am 02.01.1975
aus Hannover

Eingereicht am: 18.04.2018

Disputation am: 10.12.2018

Berichterstatter: Prof. Mag. Arch. Carsten Roth M. Arch.
Prof. Dr. med. Jürgen Graf

2018

Inhaltliche Kurzfassung

Einleitung

Bis zu einem Drittel aller Todesfälle sind weltweit auf Infektionen zurückzuführen (WHO 2015). Erreger können sich aufgrund der zunehmenden Globalisierung und der damit einhergehenden Mobilität von Menschen, Nutztieren und Gütern auf ganz neuen Ausbreitungswegen übertragen. Das vermehrte Auftreten multiresistenter Erreger stellt eine besondere Herausforderung dar. Um auf die infektiologischen Herausforderungen der Zukunft adäquat reagieren zu können, muss eine fächerübergreifende Zusammenarbeit im Sinne des „*One-Health-Konzeptes*“ (King 2008; Wieler 2014; King 2008) erfolgen.

Ziele

Ziel der vorgelegten Arbeit ist daher die Wechselwirkung von Infektionsketten und der gebauten Umwelt zu analysieren, zu bewerten und eine ganzheitliche Strategie zur baulichen Infektionsprävention abzuleiten.

Methoden

Zunächst werden die Infektionsübertragungswege auf Grundlage der Erkenntnisse der Epidemiologie dargestellt und relevante Faktoren im Zusammenspiel von Infektionsausbreitung und baulichen Aspekten analysiert. Die dabei identifizierten Baukomponenten werden anschließend auf ihre Möglichkeiten der baulichen Infektionsprävention beschrieben und bewertet sowie Optimierungspotential der bereits etablierten Baumethoden aufgezeigt.

Um neue interdisziplinäre Ansätze zur Lösung des komplexen Themenfeldes der Infektionsunterbrechung zu identifizieren, werden Experten aus unterschiedlichsten Wissenschaftsdisziplinen befragt. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse zu Themen wie z. B. dem Raumnutzungsverhalten, der Gruppendynamik, der Verhaltensökonomie oder kultureller Unterschiede in der Wahrnehmung werden über eine vertiefende Literaturrecherche aufgearbeitet und für die Entwicklung einer transsektoralen baulichen Infektionspräventionsstrategie zunutze gemacht.

Ergebnisse

Zur Kontrolle der Infektionskette wird ein transsektoraler, aus mehreren Komponenten bestehender und skalenübergreifender Ansatz gewählt, die kombinierte Multi-Skalen-Barrieren-Strategie. Die bautechnisch-konstruktive Weiterentwicklung und die baufunktional-prozessuale Optimierung ausgesuchter Baukomponenten mithilfe der

Entwicklung neuer interdisziplinärer Methoden stellen die Grundlage der Strategie dar. Darüber hinaus wird die Metabetrachtung der Planung durch die Optimierung der Planungssystematik und die Entwicklung einer Gebäudeklassifikation unter infektionspräventiven Kriterien weiter verbessert. Anhand der Darstellung von vier parallel mitentwickelten Forschungsprojekten wird das Potential der kombinierten Multi-Skalen-Barrieren-Strategie zusätzlich verdeutlicht.

Schlussfolgerung

Die vorgelegte Arbeit stellt mit ihrer Strategie eine strukturierte Grundlage für die Entwicklung einer Vielzahl von neuen Forschungsstudien durch die Kombination der weiter zu optimierenden Baukomponenten mit den neuentwickelten transsektoralen Methoden für die bauliche Infektionsprävention zur Verfügung.

Literatur

WHO (2015) World Health Statistics 2015. Geneva: World Health Organization
King, L., (2008) One Health: A New Professional Imperative. One Health Initiative Task Force: Final Report. World Health through collaboration. Hg. v. American Medical Association
Wieler, L. (2014) "One Health"--linking human, animal and environmental health. In: *International journal of medical microbiology: IJMM* 304 (7), S. 775–776. DOI: 10.1016/j.ijmm.2014.08.014.

Abstract

Introduction

Up to one third of all deaths worldwide can be attributed to infections (WHO 2015). Due to the increasing globalization and the resulting mobility of people, livestock and goods, pathogens can be transmitted in completely new ways. The increased incidence of multi-resistant pathogens presents a special challenge. In order to be able to respond adequately to the infectious challenges of the future, cross-disciplinary cooperation in the sense of the "one-health concept" (King 2008; Wieler 2014) must take place.

Objectives

The aim of the presented work is therefore to analyse and evaluate the interaction of infection chains and the built environment and to develop a holistic strategy for structural infection prevention.

Methods

Firstly, the transmission of infections is presented on the basis of epidemiological findings and relevant factors are analysed in the interaction of infection propagation and structural aspects. The identified building components will then be described and evaluated in terms of their possibilities for structural infection prevention and the optimisation potential of the already established construction methods will be demonstrated.

In order to identify new inter-disciplinary approaches to solve the complex topic of infection interruption, experts from a wide variety of scientific disciplines are interviewed. The findings on topics such as spatial use behaviour, group dynamics, behavioural economics or cultural differences in perception, which are gained from these studies, will be investigated in more depth and used to develop a trans-sectoral structural infection prevention strategy.

Results

To control the infection chain, a trans-sectoral, multi-component and multi-scale-overlapping approach is chosen, the combined Multi-Scale-Barrier-Strategy. The strategy is based on the further development of technical and construction engineering and the functional and process-related optimization of selected building components by means of the development of new trans-sectoral methods. In addition, the meta-analysis of planning is further improved by optimizing the planning system and developing a building classification under infection-preventive criteria. The presentation of four parallel

co-developed research projects illustrates the potential of the combined Multi-Scale-Barrier-Strategy.

Conclusion

With its strategy, the presented work provides a structured basis for the development of a large number of new research studies by combining the components to be further optimized with the newly developed trans-sectoral methods for structural infection prevention.

Literature

WHO (2015) World Health Statistics 2015. Geneva: World Health Organization
King, L., (2008) One Health: A New Professional Imperative. One Health Initiative Task Force: Final Report. World Health through collaboration. Hg. v. American Medical Association
Wieler, L. (2014) "One Health"--linking human, animal and environmental health. In: *International journal of medical microbiology: IJMM* 304 (7), S. 775–776. DOI: 10.1016/j.ijmm.2014.08.014.

Danksagung

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Industriebau und Konstruktives Entwerfen (IIKE) der Technischen Universität Braunschweig.

Betreut wurde die Arbeit von Herrn Prof. Mag. Arch. Carsten Roth M. Arch., dem ich für das entgegengebrachte Vertrauen und die gewährten Freiheiten danken möchte. Herrn Prof. Dr. med. Jürgen Graf danke ich besonders für die Übernahme des Koreferats und den damit verbundenen Mühen und fachlichen Hinweisen zu der Arbeit. Herrn Prof. Werner Kaag danke ich für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes und Frau Prof. Dr. phil. Karin Wilhelm für die Mitwirkung als Prüferin.

Teile der Arbeit entstanden im Rahmen der Transsektoralen-Forschungs-Plattform (TFP) des InfectControl 2020 Konsortiums. Die Koordination der TFP oblag dem Hans-Knöll-Institut in Jena. Hierfür möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr. Axel Brakhage, Herrn Prof. Dr. Oliver Kurzai und Frau Dr. Katrin Haupt bedanken.

Das Arbeitsklima am IIKE der TU Braunschweig im Allgemeinen und im Forschungsschwerpunkt Gesundheitsbauten im Besonderen ist durch ein hohes Maß an Kollegialität und Motivation geprägt. Für die allgemeine Hilfs- und Diskussionsbereitschaft bedanke ich mich herzlich bei meinen Kollegen. Hierbei sind insbesondere zu nennen:

Dr. Wolfgang Sunder, Michael Bucherer, Regina Sonntag, Malte Koeppen, Reuven Zweigel, Lars Koop, Dr. Elena Perria, Oliver Zeise, Julia Möllmann und Heike Bevern.

Meiner Frau und meinem Vater danke ich für das Korrekturlesen sowie den wichtigen Anmerkungen zum Text.

Meinen Eltern Gerlinde und Henning sowie meinen Freunden danke ich vielmals für die persönliche Unterstützung, Geduld und Aufmunterung in den letzten Jahren. Ein ganz besonderer Dank gilt meiner Frau Julia und meiner Tochter Marie, die stets Verständnis für meine Arbeit hatten und somit einen wesentlichen Beitrag geleistet haben.

Jan Holzhausen, im Dezember 2018

INHALTSVERZEICHNIS

INHALTLICHE KURZFASSUNG	I
ABSTRACT.....	III
DANKSAGUNG	V
EINLEITUNG	1
Rechtfertigung der Themenstellung	1
Ziel der Arbeit	3
Abgrenzung des Themas und themenbezogene Definition	3
Geschichte und Stand der Forschung	5
Überblick über Aufbau und Argumentationsfolge.....	6
1. ANALYSE RELEVANTER BAUFAKTOREN BEI DER INFEKTIONSÜBERTRAGUNG	9
1.1 Infektionsepidemiologie	9
1.2 Infektionsquelle.....	12
1.3 Art der Infektionsübertragung.....	12
1.4 Infektionskette.....	15
1.5 Umweltfaktoren	17
1.6 Infektionskrankheiten	17
1.6.1 Mikrobiologische Betrachtungen	18

1.6.2 Krankheitserreger.....	18
1.7 Zusammenspiel Infektionsausbreitung und bauliche Aspekte.....	20
1.7.1 Priorisierung von Infektionserregern.....	20
1.7.2 Analyse der Übertragungswege priorisierter Infektionen	21
1.7.3 Auswertung der Verteilung priorisierter Infektionsübertragungswege.....	25
1.7.4 Ableitung der relevanten baulichen Komponenten.....	26
2. BAUKOMPONENTEN DER INFEKTIONSPRÄVENTION.....	29
2.1 Bautechnisch-konstruktive Komponenten.....	30
2.1.1 Bautechnik - Bauteile und Gebäudetechnik.....	30
2.1.2 Baukonstruktion - Planung, Entwurf, Layout	32
2.2 Baufunktional-prozessuale Komponenten.....	33
2.2.1 Ablaufprozessoptimierte Planung in Entwurf und Layout.....	33
2.2.2 Planungsprozessoptimierung in der strategischen Phase.....	34
2.3 Etablierte Methoden des Bauens zur Infektionsreduzierung	35
2.3.1 Bautechnisch-konstruktive Methoden.....	35
2.3.1.1 Material und Oberflächen.....	35
2.3.1.2 Gebäudetechnik-Komponenten	37
2.3.2 Baufunktional-prozessuale Methoden.....	42
2.3.2.1 Entflechtung und gerichtete Wegeführung	42
2.3.2.2 Flächenzuweisung und Barrieren.....	44
2.3.2.3 Separierung und Isolation.....	45
3. EXAPTATION DER ERKENNTNISSE ANDERER WISSENSCHAFTSDISZIPLINEN	49
3.1 Expertenbefragung	49
3.1.1 Anlass.....	49
3.1.2 Methode	49
3.1.3 Ziel.....	50
3.1.4 Ergebnis.....	50
3.1.5 Übertrag.....	56

3.2 Zusammenspiel Raum, Mensch und Gesundheit.....	57
3.2.1 Räumliche Dimensionen der Gesundheit - Public Health.....	57
3.2.2 Räumliche Verortung der Gesundheit – Gesundheitsgeografie.....	59
3.3 Bewegungsmuster Mensch	62
3.3.1 Anthropologie - Umwelt und Gesundheit.....	62
3.3.2 Architektursoziologie	64
3.3.3 Architekturpsychologie	70
3.3.4 Dynamik Mensch Modellierung	87
3.3.5 Nudging – Indirekte Beeinflussung des Menschen.....	97
3.4 Methoden der digitalen Epidemiologie.....	100
3.4.1 Big-Data-Analyse	101
3.4.2 Modellierung der Mobilität am Beispiel Flugverkehr	102
3.4.3 Ablaufverfolgung am Beispiel Warenkette	106
3.4.4 Elektronische Kartierungswerkzeuge.....	108
4. BAULICHE INFEKTIONSPRÄVENTIONSSTRATEGIE	121
4.1 Kombinierte Multi-Skalen-Barrieren-Strategie	121
4.2 Optimierung ausgesuchter Baukomponenten	123
4.2.1 Weiterentwicklung bautechnisch-konstruktiver Gebäude-Komponenten.....	123
4.2.2 Weiterentwicklung baufunktional-prozessualer Planungs-Komponenten	125
4.2.3 Entwicklung transsektoraler Methoden	129
4.3 Weiterentwicklung der Metabetrachtung.....	136
4.3.2 Optimierung der Planungssystematik und Implementierung in BIM.....	136
4.3.3 Entwicklung einer Klassifikation für alle Gebäudetypologien	139
4.4 Entwickelte transsektorale Forschungsansätze.....	141
4.4.2 HYFLY	141
4.4.3 KARMIN	147
4.4.4 EKOS	150

4.4.5 BIPROC	153
4.4.6 Ausblick.....	156
SCHLUSSBETRACHTUNG UND AUSBLICK	159
QUELLEN.....	163
Gesprächspartner Interviews	163
Literaturverzeichnis	165
Abbildungsverzeichnis	189
Tabellenverzeichnis.....	191

Einleitung

Rechtfertigung der Themenstellung

Die Bedrohung durch Infektionskrankheiten hält trotz des medizinischen Fortschritts in den vergangenen Jahrzehnten weiter an. Weltweit sind auf Infektionskrankheiten bis zu einem Drittel aller Todesfälle zurückzuführen (WHO 2015). Allein in Deutschland sterben nach wie vor jährlich 60.000 Menschen an Infektionen (Kurza et al. 2016).

Wir sind im 21. Jahrhundert mit neuen Erregern und insbesondere neuen Ausbreitungswegen durch die zunehmende Globalisierung und damit einhergehende Mobilität von Menschen, Nutztieren und Gütern in bisher unbekanntem Ausmaß konfrontiert. Dies erfordert neue Strategien der Infektionsbekämpfung. Ehemals als „exotisch“ geltende Krankheitserreger treten auf Grund sich ändernder klimatischer Bedingungen auch in den gemäßigten Breitengraden auf. Ihre möglichen Verbreitungswege sind allerdings noch weitgehend unerforscht. Frühwarnsysteme sowie adäquate Präventionsmechanismen fehlen.

Sowohl Human- als auch Veterinärmedizin werden vor neue Herausforderungen gestellt, z. B. durch das vermehrte Auftreten zoonotischer Erreger, die von Tieren auf Menschen übertragen werden und sich pandemisch ausbreiten, wie beispielsweise bei der aviären Influenza. Es mangelt an sicheren und schnellen Diagnostika, da die zugrundeliegenden Infektionsketten noch unvollständig aufgeklärt sind (Jones et al. 2008).

Eine besondere Herausforderung stellt das vermehrte Auftreten multiresistenter Erreger dar, die nicht mit den verfügbaren Antiinfektiva bekämpft werden können. Insbesondere Patienten, deren Immunsystem beispielsweise nach einer Knochenmarkstransplantation oder Chemotherapie geschwächt ist, sind gefährdet. Diese Patientengruppen nehmen Dank der gestiegenen Lebenserwartung und der Fortschritte in der Intensivmedizin immer stärker zu. Ein drastischer Mangel an neuen effektiven Therapeutika steht dem gegenüber. Die Entwicklung solcher Antiinfektiva wie z. B. Antibiotika bis hin zur Anwendung am Patienten ist sehr zeit- und kostenintensiv. Dieser Prozess kann über zehn Jahre dauern und Gesamtkosten von über 900 Mio. USD generieren. Aus diesem Grund ist die Zahl der Firmen, die diese Antibiotika entwickeln, von 18 im Jahre 1990 auf vier im Jahre 2011 gesunken (Cooper und Shlaes 2011).

Nahezu alle Bereiche des gesellschaftlichen Zusammenlebens im 21. Jahrhundert werden von Infektionskrankheiten betroffen. Um eine signifikante Verbesserung der Infektionsbekämpfung zu erreichen, müssen Innovationen daher fachbereichsübergreifend über Wissenschaftsdisziplinengrenzen hinweg generiert werden. Diese Entwicklung neuer antiinfektiver Strategien kann nur durch eine hochgradig transdisziplinäre

Herangehensweise erfolgen. Diese Zielsetzung wird im sogenannten „*One-Health-Konzept*“ (King 2008; Wieler 2014), beschrieben. Es fordert eine fächerübergreifende Zusammenarbeit, um auf die infektiologischen Herausforderungen der Zukunft adäquat reagieren zu können. Dieses Konzept wird bislang allerdings weltweit kaum umgesetzt.

Im Gegensatz zu diesem Konzept wird in der aktuellen Forschung die Bedeutung von infrastrukturellen und räumlichen Voraussetzungen für die Infektionsbekämpfung kaum berücksichtigt. Es gibt bislang nur vereinzelt Ansätze, durch gezielte Informationskampagnen für unterschiedliche Zielgruppen (Patienten, Ärzte, Krankenhauspersonal etc.) Hygienekonzepte zu implementieren, die auch räumliche Komponenten einbeziehen.

Die Notwendigkeit der Forschung in der baulichen Infektionsprävention kann beispielhaft an der Infrastrukturimmobilie Flughafen beschrieben werden. In den zurückliegenden Jahrzehnten hat die Mobilität der Weltbevölkerung eine rasante Entwicklung genommen. Immer mehr Passagiere legen immer weitere Strecken in kürzeren Zeiten und Reiseabständen zurück. Auch die Beförderungsmittel haben sich verändert. Lange Strecken werden zunehmend mit dem Flugzeug und nicht mehr mit der Eisenbahn oder dem Schiff zurückgelegt. Etwa um den Faktor eintausend hat die räumliche Mobilität in den letzten zweihundert Jahren zugenommen. Den größten Anteil hat hierbei der Flugverkehr zu verzeichnen. Der Anteil des Luftverkehrs am weltweiten Reiseaufkommen im Jahre 2006 betrug 46%. Es stieg allein im Jahr 2014 weltweit für den Passagierluftverkehr um 6,5 % sowie im Luftfrachtverkehr um 2,2 % an (Bundesverband der Deutschen Luftverkehrswirtschaft (BDL) 2016). Der internationale Luftverkehr stellt das größte Risiko hinsichtlich der raschen und möglicherweise unkontrollierten Verbreitung einer Infektionskrankheit bzw. spezifischen, problematischen Erregern dar (Cliff et al. 2000; Massey 1933; Morens DM 1998). Dabei können verschiedene für eine Infektionsverbreitung im Luftverkehr relevante Bereiche und Faktoren identifiziert werden.

Es kommt zu vielfältigen Überschneidungen von Wegen und Prozessabläufen innerhalb des Flughafens wie auch im Flugzeug. Durch den besonders häufigen direkten oder indirekten Kontakt zwischen Passagieren besteht an diesen Schnitt- oder auch Engstellen ein stark erhöhtes Risiko einer Infektionsübertragung. Diese Schwachstellen müssen identifiziert und neue baustrukturell-funktionale und prozessuale Konzepte in Zusammenarbeit mit den Flughafenbetreibern und Flugzeugbauern entwickelt werden, um zur Entschärfung besonders kritischer Funktionsbereiche und Schnittstellen, wie z. B. Passagierschleusen, Sanitäreinrichtungen oder Abfertigungsbereiche beizutragen.

Auch zukünftige Pandemien werden als Hauptverbreitungsweg den internationalen Flugverkehr nutzen und somit ein Gefährdungspotential darstellen. Die Flughafenimmobilie als Teil des internationalen Flugverkehrs wird somit auch zukünftig ein Hauptverbreitungsweg von Pandemien sein. Auf dieses Gefährdungspotential muss mit zeitnahen und neuen Antiinfektionsstrategien reagiert werden. Auch multiresistente Bakterien sind hierbei neben den Viren als potentielle Erreger zu nennen (van der Bij und Pitout 2012).

Pandemische Ausbrüche sind somit ein globales Sicherheitsanliegen und nicht länger nur ein Faktor der klinischen Medizin. Die Kontrolle dieser Ausbrüche erfordert die Mobilisierung unterschiedlicher gesellschaftlicher Disziplinen und Akteure (Castillo-Chavez et al. 2015). Als mögliche Einflussfaktoren für den Erfolg bzw. Misserfolg eines pandemischen Krankheitserregers werden hierbei das Klima, medizinische Überwachung und die Infrastruktur mit ihren Verkehrsmitteln sowie Immobilien und der Unterstützung ihrer direkten und indirekten Übertragungsmechanismen genannt.

Ziel der Arbeit

Pathogene infektionsverursachende Mikroorganismen können auf direktem Wege von Mensch zu Mensch, Tier zu Tier oder auch zwischen Mensch und Tier übertragen werden als auch indirekt zum Beispiel über Materialoberflächen aller Art oder Klima- und Lüftungsanlagen und Frisch- bzw. Abwassersysteme als Teil der Gebäudeinfrastruktur.

Besonders in infektionskritischen Gebäuden und Einrichtungen wie Gesundheits- und Laborbauten, Verkehrsbauten aber auch in der Tierhaltung besteht ein nicht zu unterschätzendes Risiko der Übertragung von Infektionen durch Komponenten des Gebäudes.

Eine Möglichkeit zur Bekämpfung von Infektionen ist folglich die Prävention von Infektionen durch die Unterbrechung oder Reduzierung der Übertragungswege in infektionskritischen Gebäudesystemen. Kritische Wege und Punkte in diesen Systemen müssen aus bau- und prozessplanerischer Sicht identifiziert und darauf aufbauend antiinfektionsstrategische Szenarien erarbeitet werden.

Ziel der Arbeit ist daher, die Ausbreitungswege der Infektionsketten im Zusammenspiel mit Infrastruktur, Architektur und Raum zu verstehen, zu bewerten und Strategien zur Kontrolle von Infektionsverbreitungswegen in Gebäudesystemen zu entwickeln.

Abgrenzung des Themas und themenbezogene Definition

Die vorgelegte Arbeit entstand im Rahmen der Transsektoralen Forschungsplattform (TFP) als Basisprojekt des Forschungskonsortiums InfectControl 2020 (Kurzai et al. 2016). Diese Forschungsgruppe besteht aus insgesamt 14 Doktoranden unterschiedlichster Ausrichtung von Mikrobiologen über Human- und Veterinärmediziner, Klimafolgenforscher, Materialwissenschaftler, Architekten und anderen Disziplinen, die im Forschungsansatz des One-Health-Konzepts (King 2008), (Wieler 2014) einen transsektoralen Ansatz in der Infektionsprävention verfolgen (Themenfelder: medizinische Überwachung, Klima, Materialoberflächen und Infrastruktur (Castillo-Chavez et al. 2015)).

Die hier vorgelegte Arbeit nutzt das medizinische Verständnis von Infektionsübertragungswegen der Epidemiologie. Die angestrebte Unterbrechung der Infektionsketten erfolgt abgrenzend hierzu aber nicht mit Hilfe der Entwicklung von z. B. Wirkstoffen im medizinischen Sinne wie bei der Medikamentenentwicklung, sondern mit dem gezielten Einsatz von Baukomponenten zur räumlichen Unterbrechung der Ausbreitungswege bzw. der Optimierung der gebauten Rahmenparameter zur Vermeidung der Übertragung.

Die Möglichkeit der indirekten Übertragung von Krankheitserregern durch Materialoberflächen wurde in den letzten Jahren zunächst kontrovers diskutiert, wurde jedoch durch zahlreiche Studien insbesondere im Krankenhaussektor nachgewiesen (Hacek et al. 2010; Lu et al. 2009; Vandini et al. 2014; Dettenkofer et al. 2004). Die Optimierung der Oberflächeneigenschaften ist ebenfalls nicht Teil der vorgelegten Arbeit. Mit diesem Themenfeld befasste sich im Rahmen der Transsektoralen Forschungsplattform Max Hennig vom Institut für Materialforschung der Friedrich-Schiller-Universität Jena. Im wissenschaftlichen Austausch entstanden hierbei auch disziplinübergreifende Lösungsansätze, die Teile der hier vorgelegten Arbeit betrafen, im Besonderen im Verständnis zur Materialentwicklung.

Im weiteren Verständnis der Infektionsübertragung beeinflussen unterschiedliche klimatische Bedingungen die Überlebensfähigkeit von Erregern (Campbell-Lendrum et al. 2009) und müssen daher bei der Betrachtung der Infektionsverbreitung einbezogen werden. Änderungen der klimatischen Rahmenbedingungen haben Folgen für das Weltwetter und die Häufigkeit, Andauer und Intensität von Extremereignissen (Stocker 2014) sowie klimabedingte Risiken auf dem Gesundheitssektor (Wu et al. 2016). Mögliche Zusammenhänge zwischen dem Auftreten von Klimaextremen und einer erhöhten Infektionsgefährdung konnten bislang nur vereinzelt nachgewiesen werden. Die hier vorgelegte Arbeit beschäftigt sich nicht mit der Erforschung des Zusammenhangs von klimatischen Entwicklungen und deren Einfluss auf die Infektionsausbreitung. Dies bearbeitete Frank Brenner vom Potsdamer Klimafolgenforschungs-Institut im Rahmen der TFP. Aber auch hierbei konnte über den wissenschaftlichen Austausch baufremder Disziplinen wie der Klimaforschung das Verständnis für Ausbreitungsmechanismen bzw. Modellierung und die indirekte Übertragung über einen Vektor (hier Insekt) im Zusammenspiel der Klimaerwärmung Erkenntnisse für die vorgelegte Arbeit entwickelt werden.

Die hier vorgelegte Arbeit beschäftigt sich abgrenzend hierzu mit dem Verständnis der direkten und indirekten Infektionsübertragung im Zusammenspiel von Prozess, Raum und Akteur (Person, Vektor etc.) und der Beeinflussbarkeit dieser Parameter hin zu optimierten Verhältnissen zur Infektionsprävention.

Geschichte und Stand der Forschung

Die vorgelegte Arbeit entstand aus der logischen Weiterentwicklung der Forschungsprojekte „Praxis: Krankenhausbau – Handbuch zur interdisziplinären Planung und Realisierung von komplexen Gesundheitsbauten“ (Roth et al. 2015; Holzhausen et al. 2016) und „HYBAU+ Bauliche Hygiene im Krankenhaus – Leitfaden zur baulichen Entwicklung von Krankenhäusern aus hygienischen Gesichtspunkten“ (Dreßler et al. 2017; Sunder et al. 2018). In beiden Projekten wurden die komplexen Zusammenhänge und Möglichkeiten von baulichen Komponenten zur Infektionsprävention analysiert und erste Erkenntnisse auf diesem vielfältigen Wissenschaftsfeld gewonnen. Beide Forschungsprojekte bezogen sich nur auf den Bereich der Gesundheitsimmobilie, einen ganzheitlichen Ansatz, wie in vorgelegter Arbeit, über alle Gebäudetypologien hinweg wurde hier daher noch nicht angestrebt.

Im Forschungsprojekt „Praxis: Krankenhausbau“ wurde bereits erkannt, dass durch die Entflechtung der internen Abläufe im Krankenhaus auch die Überschneidungs- bzw. Kontaminationspunkte der einzelnen Erregerwege reduziert und somit die Infektionsübertragung weiter minimiert werden kann. Die architektonische Planung der einzelnen Raumabfolgen bestimmt somit maßgeblich auch den Verlauf der Patienten-, Instrumenten-, Abfall-, Besucher- und weitere Bewegungsströme im Gebäude. Die Optimierung der Prozessabläufe bei diesem Forschungsprojekt lagen u. a. im Fokus der Auslastung medizinisch wertschöpfender Geräte wie dem MRT etc.

Einen weiteren Zusammenhang von baulicher Optimierung und Infektionsprävention konnten im Forschungsprojekt HYBAU+ nachgewiesen werden, wie z. B., dass bauliche Barrieremaßnahmen, wie das Isolieren von Patienten in Intensivstationen im Krankenhaus in Einzelzimmern, die Infektionsraten verringert“ (Stiller et al. 2016).

Auch gibt es Studien zur Identifikation der Infektionserregerwege, wie z. B. im internationalen Flugverkehr (Brockmann 2008), zur Vorhersage von Epidemien in der globalisierten Welt (Hufnagel et al. 2004) und wie statistische Modulation durch die Vorhersage von Epidemien Katastrophenschutz leisten kann. Gleiches gilt für den Bereich der Identifikation des Erregerweges im Bereich der Lebensmittelsicherheit (Weiser et al. 2013), auch *Erregertracking* genannt. Ebenso gibt es Studien, die belegen, dass durch bauliche Maßnahmen bzw. Interventionen die Bewegungsströme von Menschen, also die prozessuale Komponente der Infektionsprävention, beeinflusst und gelenkt werden können (Heliovaara et al. 2013).

In der Recherche konnten aber keine Studien oder Forschungsfelder identifiziert werden, die sich mit der Prävention von Infektionsausbreitungswegen allumfassend aus bauwissenschaftlicher Sicht beschäftigen. Die bestehenden Forschungen fokussieren jeweils nur Teilbereiche, separat betrachtet nach Bau, Prozess oder Material. Die eigene Literaturrecherche wurde hierbei um eine Recherche über die Baudatenbank des Fraunhofer IRB zu diesem Themenfeld erweitert. Beide Recherchen zeigten die De-

fizite in diesem Bereich der Forschung im transsektoralen Ansatz auf, auch hier konnten keine vergleichbaren Ansätze zur vorliegenden Arbeit gefunden werden. Somit konnte ein ganzheitlicher Ansatz, wie er bei der vorliegenden Arbeit angewendet wird, im Rahmen der Recherche nicht identifiziert werden.

Überblick über Aufbau und Argumentationsfolge

Um die Wirkungsweise von Infektionsketten zu verstehen, widmet sich die Arbeit beginnend mit den Grundzügen der Epidemiologie, dem medizinischen Verständnis von geographisch und zeitlichen Ausbreitungen von Infektionskrankheiten (Hof und Geginat 2000). Bei der Vorstellung der einzelnen Komponenten der Ausbreitungswege bzw. Infektionsketten, wie z. B. Infektionsquelle oder Art der Übertragung, werden die klassischen medizinischen Gesichtspunkte der Epidemiologie um die prozessualen und räumlichen Bezüge im Hinblick auf die gebaute Umwelt herausgearbeitet.

Erst das Verständnis der Übertragungsparameter von Infektionskrankheiten schärft den Blick für die Möglichkeiten der Unterbrechung bzw. Minimierung der Infektionsübertragung mit Hilfe baulicher Komponenten. Als Beispiele sollen hier die Malaria mit dem indirekten Übertragungsweg des Vektors (Insekt/Mücke) genannt werden, der auf baulicher Seite durch die Gebäudetechnik beeinflusst werden kann oder der direkte Übertragungsweg per Tröpfcheninfektion von Mensch zu Mensch, der über den baulich beeinflussbaren Parameter des Bewegungsprozesses und seiner räumlichen Ausdehnung reguliert werden kann oder zuletzt als indirekte Übertragung des sogenannten Vehikels der unbelebten Materie, die man auch als Oberfläche bzw. verbautes Material im Gebäude entsprechend ertüchtigen kann. Die Arbeit kristallisiert über diese Vorgehensweise die neuralgischen Rahmenparameter in der Gebäudeinfrastruktur heraus, die es zur baulichen Infektionsprävention zu modifizieren gilt.

Durch die Analyse der relevanten Baukomponenten im Wechselspiel mit der Infektionskette und die Darstellung bereits etablierter Methoden der baulichen Infektionsprävention, können Lücken bzw. Optimierungspotential von Maßnahmen aufgezeigt werden.

Um darüber hinaus ein erweitertes Verständnis von Infektionsketten und Ausbruchsszenarien zu erhalten, analysiert die Arbeit die Arbeitsweisen und Lösungsstrategien anderer wissenschaftlicher Disziplinen zu diesem Themengebiet. So werden die Sichtweisen von Veterinärmediziner*innen, Physikern, Hygienikern, Risikoforschern und anderen Akteuren im Themenfeld wie z. B. der Simulation, Modellierung und Visualisierung zu einer vielschichtigen und transsektoralen Sicht zusammengetragen, die dann in Ableitung zur baulichen Infektionsprävention eingebracht wird.

Die hohe Komplexität der Herausforderung der baulichen Infektionsprävention mit ihrer Vielzahl an teilweise unscharf definierten Lücken im Handlungsverlauf des Problemlösungsprozesses erfordert einen Ansatz, der vielfältig, transsektoral und skalenübergreifend sein muss. Im Ergebnis steht die kombinierte Multi-Skalen-Barrieren-

Strategie. Diese Strategie setzt sich aus mehreren Komponenten auf unterschiedlichen Betrachtungsebenen zusammen. Grundlage stellt die Optimierung ausgesuchter Baukomponenten dar. Eine weitere Komponente der Strategie ist die Weiterentwicklung neuer transsektoraler Methoden für zukünftige Studiensettings. Die Optimierung der Metabetrachtung durch die Entwicklung einer Klassifikation und Weiterentwicklung der Planungssystematik behandelt das Themenfeld in der übergeordneten Gesamtbetrachtung.

Die Kombination der zu optimierenden Baukomponenten im Zusammenspiel der aufgezeigten transsektoralen Methoden bilden eine Grundlage für eine Vielzahl an neuen Forschungsstudien im Sinne der baulichen Infektionsprävention. Vier parallel zu dieser vorgelegten Arbeit mitentwickelten Forschungsprojekte zeigen als *Teilprojekte* einer Gesamtstrategie das Potential einer kombinierten Multi-Skalen-Barrieren-Strategie. Dieser Entwurf einer baulichen Infektionsstrategie stellt damit den strukturierten Einstieg zu einer breit angelegten Strategie der Infektionsprävention im Bereich des Bauens dar.

1. Analyse relevanter Baufaktoren bei der Infektionsübertragung

Da das Ziel dieser Arbeit die Optimierung von baulichen Maßnahmen zur Infektionsprävention ist, muss zunächst gezeigt werden, welche Art von Infektionsketten durch bauliche Interventionen beeinflusst werden können. Hierzu ist es unumgänglich, die Grundzüge der Epidemiologie im Zusammenhang mit räumlichen Parametern darzustellen. Die Epidemiologie definiert sich im Allgemeinen über die Lehre vom Auftreten häufiger Erkrankungen, sowohl infektiöser als auch nichtinfektiöser Natur, innerhalb festgelegter Zeiträume und bezogen auf definierte Bevölkerungsgruppen bzw. deren geographischer Verortung (Bonita et al. 2013). Nicht übertragbare Krankheiten wie z. B. Krebs werden bei der vorliegenden Arbeit nicht berücksichtigt, da diese nicht über bauliche Parameter im Sinne einer Infektionsprävention beeinflusst werden können. Die Infektion als Übertragung eines spezifischen Krankheitserregers auf einen Wirt und ihre unterschiedlichen Wege dieser Infektionskette im räumlichen und damit infrastrukturellen und baulich-architektonischen Zusammenhang werden im folgenden Kapitel dargestellt.

1.1 Infektionsepidemiologie

Die früher als Seuchenlehre bezeichnete Infektionsepidemiologie beschäftigt sich mit den zeitlichen und geographischen Ausbreitungen von Infektionskrankheiten. Der geographische Parameter stellt hierbei die erste, wenn auch großmaßstäbliche, Variante der räumlichen Verortung bzw. Bezug zur Infektion dar.

Die Infektionskrankheiten können neben dem sporadischen Auftreten als Endemie, Epidemie oder Pandemie in unterschiedlicher Konstellation nach geographischen oder zeitlichen Komponenten auftreten. So bezeichnet die **Endemie** das geographisch, nicht aber zeitlich begrenzte Auftreten einer Infektionskrankheit. Beispielhaft wäre eine Infektionskrankheit bei einer Endemie somit in einer bestimmten Region dauerhaft anzutreffen. Im Zuge des internationalen Tourismus ist dieses Wissen über Endemiegebiete von entscheidender Bedeutung im Sinne des Expositionsrisikos geworden.

Bei der **Epidemie** treten die beiden Faktoren Zeit und geographischer Zusammenhang jeweils begrenzt auf, wenn also eine Infektionskrankheit innerhalb eines begrenzten Zeitraumes und einer begrenzten geographischen Region auftritt. Wird hierbei ein Krankheitserreger so stark und schnell gestreut, dass ihn zur gleichen Zeit ein großer Anteil einer Bevölkerungsgruppe aufnimmt, dann handelt es sich um eine so genannte **Explosivepidemie**. Im Gegensatz hierzu bezeichnet die **Tardivepidemie** die schleichende Verbreitung angenommener sporadischer Infektionskrankheitsfälle, die sich

aufgrund ihrer Streuung eines Krankheitserregers durch persönlichen Kontakt und damit langsameren Verbreitung erst zeitlich verzögert als Epidemie entpuppt.

Ist der geographische Faktor einer Epidemie nicht mehr begrenzt und breitet sich die Infektionskrankheit weltweit aus, so bezeichnet man dies als **Pandemie**. Hierbei handelt es sich um ein zeitlich, aber nicht mehr örtlich begrenztes Auftreten einer bestimmten Infektionskrankheit.

Bei der Epidemiologie werden unterschiedliche Methoden verfolgt, um vorausschauende und rückblickende Aussagen zum Verlauf von Krankheitsausbrüchen zu erhalten. Je nach Methode kann das Maß an Zuverlässigkeit in der Aussage beschrieben werden. So wird bei der **prospektiven Epidemiologie** eine vorausschauende Beobachtung einer ausgewählten Personengruppe über einen definierten Zeitraum durchgeführt und anschließend analysiert. Diesen prospektiven Studien werden größte Zuverlässigkeit in ihrer Aussage zugewillt. Sie sind aber schwer zu realisieren und daher selten.

Dem gegenüber steht die rückblickende Beobachtung einer Personengruppe, die sich durch eine bestimmte Krankheit auszeichnet und rückblickend bezüglich ihrer Lebensumstände analysiert wird. Die Studien dieser **retrospektiven Epidemiologie** werden häufig durchgeführt, ihre Aussagekraft sollte aber mit Vorbehalt bewertet werden, da die Datenerhebung und deren Umstände ursprünglich nicht für die Auswertung der retrospektiven Betrachtung aufgesetzt wurden, sondern in einem anderen Zusammenhang bzw. für einen anderen Zweck erfasst wurden.

Bei der **induktiven Epidemiologie** wird aus Einzelbeobachtungen Rückschlüsse für Gesetzmäßigkeiten für die Entstehung und den Verlauf einer Krankheit im Allgemeinen abgeleitet. Dem gegenüber steht die **deduktive Epidemiologie**. Hierbei sind die Rahmenbedingungen für den Ursprung und Verlauf der Erkrankung bekannt, jedoch sollen durch spezifische experimentelle Eingriffe im bekannten System Gesetzmäßigkeiten verändert werden. Als Beispiel kann hier in der klassischen Medizin die Schutzimpfung genannt werden, durch die der Ausbruch einer bestimmten Infektionskrankheit innerhalb der geimpften Personengruppe verhindert werden soll. Bezogen auf räumliche Parameter könnten diese Eingriffe ins bekannte System z. B. durch physische Barrieremaßnahmen wie eine Schleusensituation auf einer Intensivstation vorgenommen werden. Die Auswirkungen solcher Maßnahmen müssten dann entsprechend der deduktiven Epidemiologie analysiert und bewertet werden.

Im Folgenden werden die wichtigsten Begriffe für die Beschreibung einer epidemiologischen Situation im Zusammenhang mit einer Infektionskrankheit dargestellt. Die **Morbidität** beschreibt die Anzahl der an einer bestimmten Krankheit leidenden Personen innerhalb eines bestimmten Zeitraumes. Hierbei bezieht man sich z. B. auf einen Anteil von 10.000 oder 100.000 einer bestimmten Bevölkerungsgruppe innerhalb eines Jahres. Weitere differenzierende Kriterien können dabei auch z. B. Geschlecht oder Alter sein. Bezieht man sich bei der Beschreibung der Anzahl Infizierter auf einen bestimmten Stichtag, so spricht man hierbei von **Prävalenz**, ebenso bezogen auf z. B. 10

oder 100.000 Einwohner. Die **Inzidenz** beschreibt die Anzahl der infizierten Personen einer erstmals erlittenen Erkrankung innerhalb eines definierten Beobachtungszeitraumes. Die Anzahl derer an einer bestimmten Infektionskrankheit verstorbenen Personen innerhalb eines definierten Beobachtungszeitraumes wird über die **Mortalität** beschrieben, diese wiederum bezogen auf 10 bzw. 100.000 einer Bevölkerung. Die **Letalität** beschreibt die Sterberate in Prozent der betroffenen Personen, die an einer Infektion erkrankt sind. So versterben z. B. 6 % der Erkrankten, wenn die Letalität der entsprechenden Krankheit bei 6 % liegt.

Bereits vor mehr als 2000 Jahren stellte Hippokrates fest, dass Umweltfaktoren das Auftreten von Krankheiten beeinflussen können (Bonita et al. 2013). Als Umweltfaktoren können hier das Klima und die geographische Lage bei Auftritt einer Krankheit, aber eben auch Faktoren der von Menschenhand gebaute Umwelt der Infrastruktur, wie Wasser- und Luftqualität sowie weitere hygienische Aspekte in diesen Gebäudesystemen, darstellen. Doch erst fast zwei Jahrtausende später im 19. Jahrhundert wurden Infektionskrankheiten in bestimmten Personengruppen systematisch erfasst und ihre Zusammenhänge erkannt. So gilt John Snow als Vater der modernen Infektionsepidemiologie (Gordis 2014). Er erkannte, dass im Zusammenhang mit den Choleraepidemien in London der Jahre 1848/49 sowie 1853/54 die Herkunft des Trinkwassers einen verbindenden Faktor aller an Cholera erkrankten Todesfälle darstellen musste. So ließ er die Wohnungen der Verstorbenen kartographieren und ergänzte dies um die Wasserversorgung dieser Haushalte, in diesem Fall die zugehörigen Brunnen der jeweiligen Stadtteile. Bei dieser Auswertung konnte er feststellen, dass bei den Menschen, die durch das Wasserwerk Southwark und ihre angeschlossenen Brunnen versorgt wurden, die Anzahl der chole-rabedingten Todesfälle erhöht war (Bonita et al. 2013).

Bei dem Auszug des Stadtplans von London, den Snow 1855 in Auftrag gab (s. Abbildung 1), entspricht jeder schwarze Balken einem Todesfall durch die Cholera des Ausbruchs von 1854. Innerhalb des Ringes liegt der Brunnen der Broad Street. Der Lageplan zeigt, dass jedes Opfer innerhalb des markierten Bereichs dichter am Brunnen der

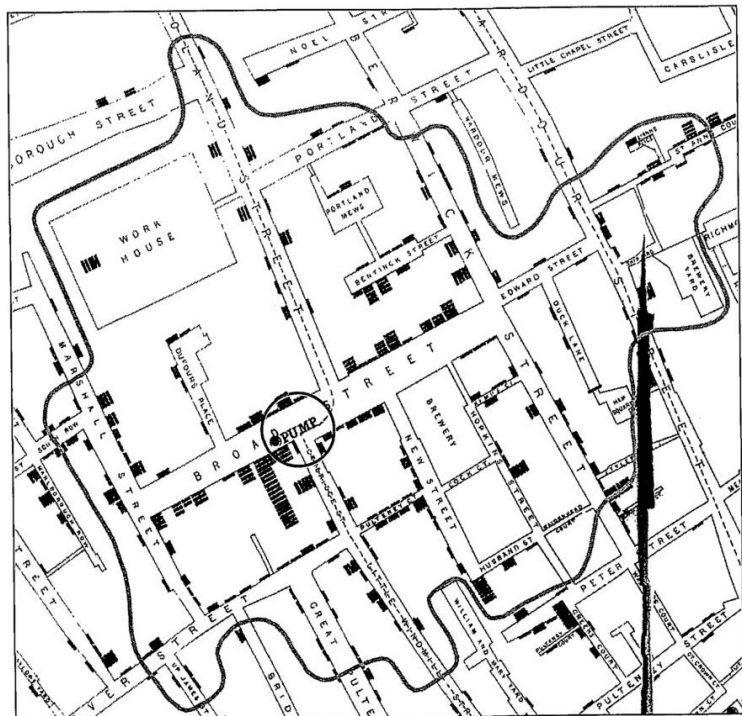


Abbildung 1: Auszug Stadtplan London: Cholerabedingte Todesfälle in Zentral-London September 1854 (Slonczewski und Foster 2012)

Broad Street lebte als an anderen umliegenden Brunnen (Slonczewski und Foster 2012). Auf dieser Grundlage konnte John Snow erstmals eine Theorie zur Übertragung von Infektionskrankheiten darlegen, in dem er die Verbreitung von Cholera mit verunreinigtem Wasser in Zusammenhang bringen konnte. Für den Bereich der baulichen Infektionsprävention stellt in diesem methodischen Vorgehen die räumliche Komponente den interessantesten Teil dar. So konnte Snow erst durch die räumliche Verortung der Wohnungen der Erkrankten sowie der Brunnen als Quelle der Infektion im Stadtplan einen Zusammenhang darstellen.

1.2 Infektionsquelle

Krankheitserreger werden entweder von infizierten Lebewesen, d. h. von **Menschen und Tieren**, oder von **kontaminierten Gegenständen** auf und in den Menschen verbracht (Gordis 2014).

Bei der Übertragung durch den **Menschen** wird unterschieden zwischen dem Kranken und dem Keimträger. Der **Kranke** kann als Inkubationsausscheider, Rekonvaleszenzausscheider und als Dauerausscheider auftreten. Der **Inkubationsausscheider** verteilt seine Krankheitserreger zu einem Zeitpunkt als seine eigene Infektionskrankheit noch unerkannt ist. Der **Rekonvaleszenzausscheider** hat seine eigene akute Infektion überstanden, kann aber noch infizieren und kontaminieren. Der **Dauerausscheider** scheidet auch noch nach über 3-6 Monaten nach überstandener Infektionserkrankung Erreger aus. In der Infektionshygiene besonders schwierig auszumachen sind die Keimträger. Diese **Keimträger** sind Personen, die Erreger mit sich tragen ohne selber krank oder rekonvaleszent zu sein.

Die Infektionsübertragung durch **Tiere** erfolgt durch **Bisse** bzw. **Stiche**.

Für die bauliche Infektionsprävention steht als primäre Infektionsquelle die in der Medizin als **unbelebte Materie** bezeichnete Umgebung im Fokus der Betrachtung. Diese unbelebte Materie stellt sich als kontaminierte Gegenstände oder Teile der Umwelt wie Gebrauchsgegenstände, Wasser, Milch, Nahrung, Kleidung, Besteck, chirurgische Instrumente etc. bis hin zur **gebauten Umwelt in Form von Gebäuden** mit ihren Oberflächen, Materialien und technischen Anlagen dar.

1.3 Art der Infektionsübertragung

Im folgenden Abschnitt werden die Infektionswege der **exogenen Infektion** beschrieben. Hierbei stammt die Infektion bzw. der Erreger aus der Umgebung des Patienten, im Gegensatz zur endogenen Infektion, auch Autoinfektion genannt, wobei der Erreger aus der körpereigenen Flora stammt und bei geschwächtem Immunsystem über die Haut, aus der Lunge oder dem Darm in den Blutkreislauf gelangt.

Aus Sicht der baulichen Infektionsprävention können nur exogene Infektionen unterbrochen bzw. reduziert werden, da hierbei der Übertragungsweg außerhalb des

menschlichen Körpers mit Hilfe von baulichen Maßnahmen wie z. B. einer Barriere- oder Schleuse beeinflusst werden kann.

Exogene Infektionen beim Menschen können direkt oder indirekt übertragen werden. Die **direkte Infektionsübertragung** kann von Mensch oder Tier durch Tröpfcheninfektion, direkten Kontakt und Genitalkontakt erfolgen. Bei der **Tröpfcheninfektion** werden keimhaltige Sekrettröpfchen durch Husten, Niesen und Sprechen meterweit verbreitet. Die größeren Sekrettröpfchen fallen schnell zu Boden, aber die kleinen ($<4\mu\text{m}$) halten sich stundenlang in der Schwebe. Beim **direkten Kontakt** mit menschlichen oder tierischen Sekreten und Ausscheidungen (Blut, Speichel, Mutter- und Tiermilch, Stuhl, Urin etc.) können Infektionen auf kurzem Wege übertragen werden. Ebenso können Infektionen direkt bei **Genitalkontakt**, d. h. bei Geschlechtsverkehr oder dem Geburtsvorgang übertragen werden.

Die **indirekte Infektionsübertragung** kann durch Vehikel, luftgetragene Partikel oder Vektoren geschehen. Mit **Vehikel** sind hierbei wiederum **kontaminierte Gegenstände oder Teile der Umwelt** (unbelebte Materie wie z. B. Wasser, Nahrungsmittel, Oberflächen) gemeint. Aerogene Mikroorganismen können mittels **luftgetragener Partikel** bei der indirekten Infektionsübertragung von Bedeutung sein. Wenn sehr kleine Tröpfchen durch die Luft zu einer geeigneten Eintrittspforte, meist die Atemwege, transportiert werden, kann eine aerogene Übertragung auch über große Entfernungen stattfinden. Ebenfalls ermöglichen Staubpartikel eine Übertragung von z. B. Pilzsporen durch die Luft (Bonita et al. 2013). Hierbei kann die Luft als Vehikel im erweiterten Sinne bezeichnet werden. Die **iatrogene Infektion** aufgrund von Hygienefehlern bei Verletzungen der äußeren Schicht des Menschen durch beispielsweise Rasieren, Nadelpunktion, Akupunktur, Ohrlochstechen, Maniküren, Tätowieren etc. kann ebenso zur den Vehikel-Übertragungswegen gezählt werden. Dem gegenüber steht die indirekte Infektionsübertragung durch Vektoren. Bei den **Vektoren** wird die aktive und passive Übertragung unterschieden. Bei der aktiven Infektionsübertragung trägt der Vektor als **Zwischenwirt** den Erreger in sich.

Als Beispiel hierfür kann ein blutsaugendes Insekt wie die Gelbfiebermücke als Überträger des Gelbfiebers oder Zika-Virus genannt werden. Bei der passiven Übertragung wird der Vektor nur mit dem Erreger oberflächlich kontaminiert (Schmierinfektion). Der Vektor ist somit ein **Transportwirt** wie z. B. die Stuben- oder Schmeißfliege oder die Kakerlake.

Die Unterscheidung der Übertragungswege ist wichtig, wenn festgelegt werden soll, mit welchen Maßnahmen eine

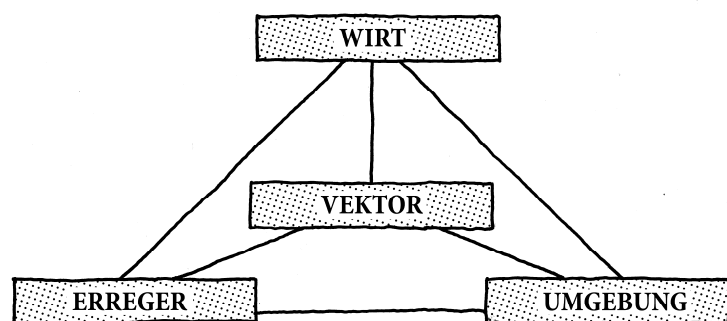


Abbildung 2: Der epidemiologische Dreieck einer Infektionskrankheit (in Anlehnung an Gordis 2014)

Infektionsübertragung aus baulicher Sicht reduziert und im besten Fall unterbunden werden kann.

Um den Menschen mit Hilfe baulicher Interventionen vor der Übertragung von Infektionskrankheiten zu schützen, müssen die Übertragungswege verstanden werden, d. h. wie die Erreger von der unmittelbaren Umgebung in den Menschen gelangen. In der Medizin wird dies über die sogenannten **Eintrittspforten der Erreger** (s. Abbildung 3) beschrieben. Dabei wird im Wesentlichen zwischen enteralen und parenteralen Infektionen unterschieden.

Bei der **enteralen Infektion** dringen die Krankheitserreger über den Darm in den Organismus ein. Dabei gilt der gesamte Verdauungstrakt inkl. Mund, Rachen, Speiseröhre, Magen und der Darm als Eintrittspforte der Krankheitserreger. Beispielhaft ist hier die **fäkal-orale Infektion** durch verunreinigtes Trinkwasser zu nennen bei dem Erreger aus Fäkalien über den Mund in den menschlichen Organismus gelangen. Dies kann ebenso durch verunreinigte Speisen geschehen.

Dem gegenüber bezeichnet man als **parenterale Infektion** eine Übertragung der Krankheitserreger „am Darm vorbei“ bzw. direkt ins Blut. Dabei gelangen die Erreger über die Haut (perkutante Infektion), die Schleimhäute (permuköse Infektion), die Atemwege (Inhalationsinfektion), den Harntrakt (urogenitale Infektion) oder über die Geschlechtsorgane (genitale Infektion) in den menschlichen Organismus ein.

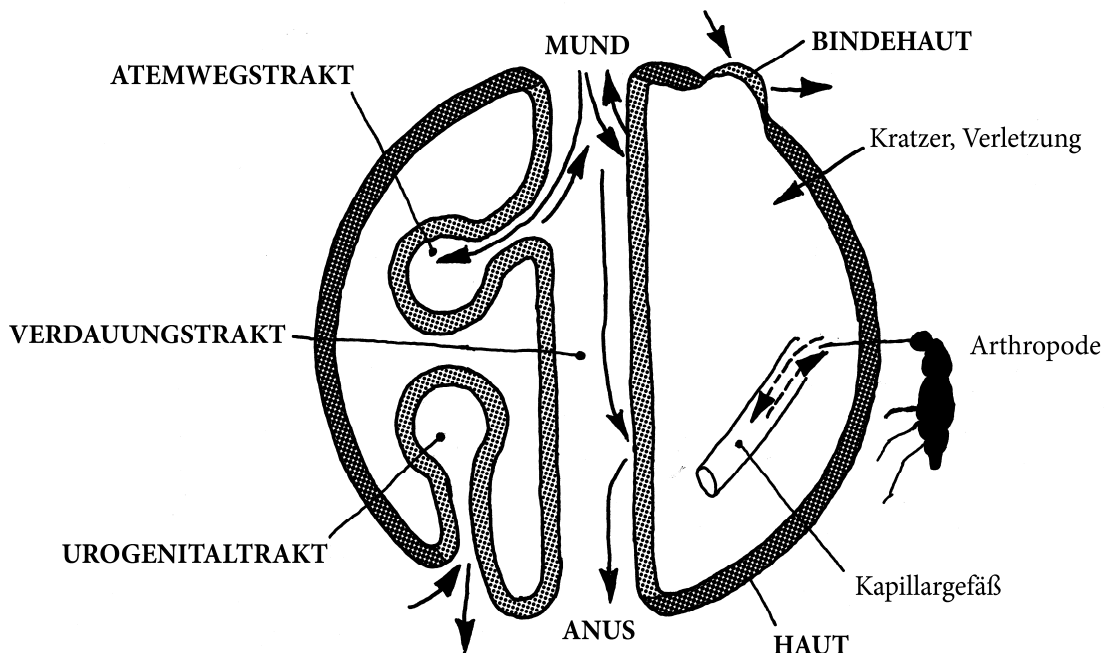


Abbildung 3: Eintrittspforten mikrobieller Erreger beim Menschen in (Anlehnung an Mims et al. 2001)

Als Umgebungsparameter, die über die bauliche Infrastruktur dicht an die menschlichen Eintrittspforten gebracht werden, sollten somit Nahrung (enterale Infektion), Trinkwasser (Versorgungsleitungen) und Essen (Großküchen), Atem-Luft (technische Raum-Luft-Anlagen - Inhalationsinfektion) und Oberflächen (perkutane und indirekte enterale Infektion) genauer betrachtet werden.

1.4 Infektionskette

Nachdem bekannt ist, welche unterschiedlichen Faktoren bzw. Akteure bei der Infektionsübertragung mitwirken können, kann nun die jeweilige Kombination der Akteure des Infektionsweges bzw. -kette beschrieben werden, um die Art der baulichen Maßnahme zur Infektionsprävention entsprechend wählen zu können.

Zunächst muss der **Weg** erkannt werden, um eine sinnvolle Bekämpfung der Infektionskrankheiten zu gewährleisten. Bei dem **homogenen Infektionsweg** sind nur Menschen und Wirbeltiere beteiligt. Wenn auch Spinnen und Insekten beteiligt sind spricht man vom **heterogenen Infektionsweg**. Wenn ausschließlich Menschen betroffen sind handelt es sich um eine **homonome Infektionskette**. Bei einer **heteronomen Infektionskette** sind neben dem Menschen auch Tiere betroffen.

Aus diesen vier Definitionen können sich nun wiederum durch Kombination die folgenden **Infektionsketten** beschreiben lassen. Bei der **homogen-homonomen Infektionskette** findet die Übertragung von Mensch zu Mensch statt, nur er ist betroffen. Beispielhaft sind hier genannt alle sexuell übertragbaren Krankheiten. Für den Bereich der baulichen Infektionsprävention gehören hierzu auch alle durch Tröpfcheninfektion übertragbaren Krankheiten sowie durch kontaminierte Lebensmittel oder Trinkwasser verbreitete Infektionen. Findet die Übertragung von Tier zu Mensch statt und alle Beteiligten sind erkrankt, so spricht man von einer **homogen-heteronomen Infektionskette**, wie z. B. Tollwut. Bei der **heterogen-homonomen Infektionskette** findet die Übertragung von Mensch zu Mensch mit Zwischenschaltung eines Vektors, wie z. B. ein Insekt oder Spinnentier, statt, wobei der Vektor selbst nicht erkrankt ist, wie z. B. bei der Malaria. Findet die Übertragung von Tier zu Mensch über einen Vektor statt, so spricht man von einer **heterogene-heteronomer Infektionskette**, wie z. B. bei der Pest von der Ratte über den Vektor Floh zum Menschen.

Die beschriebenen **Infektionsketten** resultieren aus einem Zusammenspiel zwischen:

- Krankheitserreger
- Wirt
- Umgebung, Umwelt, Raum
- Übertragungsprozess

Zur Kontrolle dieser Infektionskrankheiten ist unter Umständen die Veränderung einer oder mehrerer dieser Komponenten erforderlich (Bonita et al. 2013). Die Modifikation bzw. Veränderung der vier Komponenten mit Hilfe der baulichen Infektionsprävention

lassen sich wie folgt beschreiben. Der **Krankheitserreger** selbst ließe sich über die gebaute Umwelt höchstens inaktivieren, wenn er für Temperatur-, Licht- oder Luftveränderung sensibel wäre und diese über z. B. haustechnische Anlagen steuern ließe. Der **Wirt** ließe sich über bauliche Quarantänemaßnahmen isolieren und durch die Gebäude in seinem Bewegungsprozess beeinflussen. Die **Umgebung** in Form der gebauten Umwelt bzw. Gebäude ließe sich zur baulichen Infektionsprävention modifizieren, wie es Ziel dieser Arbeit ist. Der **Übertragungsprozess** ließe sich ebenfalls über die im Gebäude implementierte Prozessplanung der Akteure verändern.

1.5 Umweltfaktoren

Im Bereich der Umweltepidemiologie wird sich mit den Parametern beschäftigt, die eine entscheidende umweltbedingte Rolle bei der Entwicklung von übertragbaren Krankheiten spielen (Bonita et al. 2013). Hierbei wird untersucht, welche dieser Umweltfaktoren besondere Abschnitte der Infektionskette beeinflussen. Allgemein werden als Umweltfaktoren u. a. allgemeine Hygieneverhältnisse, Wasserqualität, Temperatur, Luftverschmutzung, aber auch wirtschaftliche und soziale Komponenten wie z. B. Armut, Bevölkerungsdichte und beengte Wohnverhältnisse bezeichnet. Viele dieser genannten Umweltfaktoren werden nicht nur über die natürliche, sondern auch über die gebaute Umwelt, wie die Infrastruktur und Gebäude, maßgeblich mitbestimmt.

Der Begriff Umwelt wird häufig sehr großzügig verwendet als Beschreibung aller körperexternen Faktoren, die Einfluss auf die Gesundheit nehmen können (WHO 1997). Die Umweltfaktoren, die die menschliche Gesundheit im Allgemeinen beeinträchtigen können, werden hierbei in Gruppen von Einflussfaktoren gegliedert. Den Gruppen der unfallassozierten Faktoren wie dem Einfluss von Medikamenten bzw. Drogen oder Alkohol und chemische Faktoren wie Nikotin, hautreizende Stoffe oder Nahrungsmittelzusätze spielen nur untergeordnete Rollen bei der Betrachtung zur baulichen Infektionsprävention. Eher kann den psychologischen Faktoren wie Stress, Schichtarbeit oder Arbeitslosigkeit, den biologischen Faktoren wie Bakterien, Viren, Parasiten und den physikalischen Faktoren wie Lärm, Klima oder Strahlung mit Mitteln der baulichen Optimierung entgegengetreten werden. Insgesamt sollen 25-33% der weltweiten Erkrankungen durch den Einfluss von Umweltfaktoren hervorgerufen sein (Smith et al. 1999) (Prüss-Üstün und Corvalán 2006).

Um die Wirkung von Umweltfaktoren beschreiben zu können, fällt den Begriffen Exposition und Dosis in der Umwelt- und Arbeitsepidemiologie eine besondere Rolle zu. Die Exposition stellt die Umgebungseinflüsse dar, die auf ein Lebewesen einwirken. Die **Exposition** hat zwei Dimensionen, sowohl Dauer als auch Höhe. Die **Dosis** beschreibt hierbei das Maß einer bestimmten Menge der Exposition. Über diese zwei Begriffe können Zusammenhänge zwischen einer Erkrankung und der Exposition eines Menschen aufgrund von Umweltfaktoren aufgedeckt werden.

1.6 Infektionskrankheiten

Für die menschliche Sterblichkeit bleiben mikrobielle Krankheiten die Ursache Nummer eins, trotz aller Fortschritte im öffentlichen Gesundheitssystem und der modernen Medizin (Slonczewski und Foster 2012). In diesem Abschnitt sollen die grundlegendsten Informationen zu Infektionskrankheiten dargestellt werden, um ein Verständnis für die Wirkweisen im mikrobiologischen Zusammenhang zu erlangen. Erst dieses Verständnis kann zur Entwicklung von baulichen Infektionspräventionsstrategien führen.

1.6.1 Mikrobiologische Betrachtungen

Die Mikrobiologie verdankt ihren Namen der Tatsache, dass ihre Lehre und Wissenschaft von den Mikroorganismen nicht mit bloßem Auge erkannt werden können, sondern erst ab ca. 1670 durch die Erfindung des Mikroskops sichtbar gemacht werden konnten. Diese Mikroorganismen sind mikroskopisch kleine Lebewesen (Organismen), die auch als Mikroben oder Kleinstlebewesen bezeichnet werden. Wichtige Funktionen werden von Mikroorganismen im allgemeinen Stoffkreislauf wahrgenommen. So bilden Mikroorganismen, z. B. die Kieselalge als Produzent, die Grundlage vieler Nahrungsketten. Sie bauen als Destruenten organische Materie zu anorganischen Stoffen um oder erzeugen eine Stoffumwandlung wie z. B. bei der Antibiotikaproduktion (Slonczewski und Foster 2012). Für den Bereich der baulichen Infektionsprävention ist jedoch die Eigenschaft der Mikroorganismen am interessantesten, die als Parasiten und Erreger von Infektionskrankheiten in Erscheinung zu treten.

Die Mikroorganismen werden wiederum in Gruppen eingeteilt. Je nach Wissenschaft und Lehre von den Bakterien (Bakteriologie), den Viren (Virologie), den Pilzen (Mykologie) und den Parasiten (Parasitologie). Daher werden Infektionskrankheiten auch häufig nach dem Typ des Erregers bezeichnet, so spricht man z. B. von einer Pilzinfektion, bakteriellen oder parasitären Infektion.

1.6.2 Krankheitserreger

Bei der **bakteriellen Infektion** werden Bakterien passiv oder aktiv in einen Wirt verbracht. Dieser Wirt kann pflanzlicher, tierischer oder menschlicher Natur sein. Die Bakterien vermehren sich im Wirt. Der Organismus reagiert nach Ablauf der sogenannten Inkubationszeit in Form einer Erkrankung. Die Bakterien gelangen zumeist aus der Umwelt über die Luft oder Lebensmittel in den Menschen. Daher ist beim Menschen der Verdauungstrakt sowie die Schleimhaut des Atemtraktes besonders betroffen. Die Haut des Menschen als Grenzorgan zur Umwelt stellt jedoch den höchsten Anteil bakterieller Infektionsquellen dar (Kayser 2014). Der Infektionsweg kann somit indirekt über das Vehikel wie Wasser und Nahrung sowie luftgetragen sein oder direkt über Tröpfcheninfektion oder Direktkontakt erfolgen.

Dringen Viren aktiv oder passiv in einen pflanzlichen, tierischen oder menschlichen Organismus ein und vermehren sich dort, so spricht man von einer **Virusinfektion**. Im Gegensatz zu Bakterien sind Viren nur innerhalb von Wirtszellen vermehrungsfähig. Diese zur Virusvermehrung umfunktionierte infizierte Zelle kann vom Immunsystem des Wirtes erkannt werden. Das Immunsystem versucht im Folgenden diese Zelle zum Absterben zu bringen. Die daraus resultierende Entzündung kann weitere Zellen in Mitleidenschaft ziehen und zu einer Erkrankung führen, wie sie für den jeweiligen Virus typisch ist. Für den Virus ist es von Vorteil, wenn sein sogenannter Reservoir-Wirt nicht stirbt, da er auf ihn zur Vermehrung angewiesen ist. Daher sind solche Viren am erfolgreichsten, die sich weltweit ausbreiten konnten, wie z. B. das Rhinovirus, das für

Schnupfen verantwortlich ist. Die nächste Stufe sind diejenigen Viren, die ihren Wirt über eine ausreichend lange Zeit scheinbar unbeeinträchtigt lassen, während sie sich schon zum nächsten Wirt übertragen haben, wie z. B. Tollwut oder das HI-Virus (Slonczewski und Foster 2012). Die für den Menschen gefährlichsten Viren sind diejenigen, die sich am unvorteilhaftesten an ihren Wirt angepasst haben, d. h. sie töten ihn, wie z. B. das Ebola-Virus. Virusinfektionen können über nahezu alle Infektionswege übertragen werden. Die direkte Übertragung über Tröpfcheninfektion wie z. B. bei SARS, Influenza, Schnupfen, Röteln, Mumps, Masern. Ebenso bei der direkten Übertragung bei Genitalkontakt wie beispielsweise der Übertragung von AIDS, Hepatitis B, C, D. Indirekte Wege über Vehikel bei der Schmier- und Kontaktinfektion durch Berührung kontaminierter Gegenstände bei z. B. Durchfall, Kinderlähmung oder bei Ebola oder dem Lassa-Fieber. Vektorübertragende Infektionen durch blutsaugende Insekten wie Zeckenbisse oder Mückenstiche wie z. B. Erkrankungen an FSME, dem Gelb- oder Dengue-Fieber (Heymann 2015).

Bei der Infektion eines Wirtes durch das Anhaften oder Eindringen von pathogenen Pilzen oder ihren wachstums- und vermehrungsfähigen Teilen, den sogenannten Sporen, und dem beginnenden Wachstum des Pilzes im Wirt mit anschließender Erkrankung bzw. Schädigung mit entsprechenden Symptomen wird von einer **Mykose** oder **Pilzinfektion** gesprochen. Die Erreger breiten sich parasitär auf oder im Gewebe des Wirtes aus. Dabei wird zwischen oberflächlichen und systemischen Mykosen unterschieden. **Oberflächliche Mykosen** betreffen die Haut und die Schleimhäute. Diese werden z. B. indirekt von Mensch zu Mensch über ein Vehikel, wie der Hautschuppe, übertragen. Bei den **systemischen Mykosen** gelangen die Erreger zumeist über die Lunge in den Blutkreislauf. Von dort befallen sie die inneren Organe. Diese Form der Mykose tritt fast ausschließlich bei Patienten mit geschwächtem Immunsystem auf, ihre Erreger sind beispielsweise Aspergillen.

Im Gegensatz zu den vorgenannten Infektionen durch Bakterien, Viren oder Pilzen spricht man bei Infektionskrankheiten, die über Parasiten, d. h. Lebewesen, die bei anderen Lebewesen, den Wirten, schmarotzen, übertragen werden von einer **parasitären Infektionskrankheit** oder **Parasitose**. Dabei unterscheidet man zwischen Endo- und Ektoparasiten. Die Endoparasiten leben im Wirt, wie z. B. Protozoen oder Würmer. Die Ektoparasiten leben auf anderen Organismen. Sie zapfen nur die für ihre eigene Versorgung benötigten Organe des Wirtes an, wie z. B. Stechmücken, Läuse oder Zecken (Slonczewski und Foster 2012). Diese sind dann wiederum Überträger von Infektionskrankheiten wie z. B. Malaria oder Lyme-Borreliose. Bei dem aktiven oder passiven Eindringen von Protozoen in einen Organismus mit anschließender Vermehrung und darauffolgender Reaktion in Form einer Erkrankung spricht man von einer **Protozoeninfektion** oder Protozoonose. Dies stellt eine Unterart der parasitären Infektion dar. Als Protozoen, früher Urtierchen genannt, bezeichnet man eukaryotische Einzeller. Diese eukaryotischen, d. h. mit einem oder mehreren Zellkernen ausgestattete lebende Einzelzellen können koloniale Verbände bilden (Westheide und Rieger 2007). Menschen können

sich direkt über Geschlechtsverkehr mit Protozoen infizieren. Indirekte Übertragungswege sind mittels Vehikel wie z. B. verunreinigte Nahrung oder einen Vektor d. h. einen Insektenstich möglich. Eine weitere Unterart der parasitären Erkrankung stellt die **Wurmerkrankung** bzw. Helminthiasis dar. Die Würmer, die für den Menschen hierbei von Belang sind, zählen zu den Platt-, Band-, Saug-, und Fadenwürmern. Die Übertragung dieser parasitären Infektionskrankheit findet meistens über ein Vehikel wie über die Nahrungsaufnahme statt, wie z. B. bei der Trichinose von nicht genügend durcherhitztem Fleisch.

1.7 Zusammenspiel Infektionsausbreitung und bauliche Aspekte

Nachdem nun die Grundzüge der Infektionsepidemiologie mit ihren Erregern, Krankheiten und Infektionsquellen aufgezeigt wurden, sollen im nächsten Schritt die für die bauliche Infektionsprävention wichtigen Erkenntnisse der Übertragungswege weiter analysiert werden. Hierbei ist es entscheidend, wo in der Infektionskette bauliche Komponenten zur Prävention bzw. Unterbrechung eingesetzt werden können. Darüber hinaus müssen bauliche Komponenten, die Infektionsketten zerschlagen oder zumindest erschweren, in Grundzügen für eine weitere Betrachtung aufgezeigt werden.

1.7.1 Priorisierung von Infektionserregern

Eine der größten Herausforderungen des Infektionsschutzes ist die große Anzahl unterschiedlichster Erregertypen, die eine Erstellung einer Rangfolge aufgrund ihrer unterschiedlichsten epidemiologischen und pathologischen Eigenschaften schwer realisieren lässt (Robert Koch-Institut (RKI) 2008). Da die **Ressourcen für den Infektionsschutz** aber **begrenzt** sind, ist es trotzdem sinnvoll **Infektionserreger nach Public-Health-Kriterien zu priorisieren**. Das Robert Koch-Institut hat ab 2004 eine Methode entwickelt, ein Priorisierungsschema zu etablieren. Zunächst wurde hierzu eine Liste aller in Frage kommender zu priorisierenden Erreger erstellt. Diese Liste wurde aus fünf Quellen gefüllt (Robert Koch-Institut (RKI) 2011). Dies sind zum einen die meldepflichtigen Infektionskrankheiten nach §6 der Infektionsschutzgesetzes (IfSG 2000); berichtspflichtige Erreger innerhalb der europäischen Union (European Commission Communicable Disease Network 2009); meldepflichtig an die WHO nach den Internationalen Gesundheitsvorschriften (WHO 2008); Erreger mit Potenzial für absichtliche Freisetzung (Tegnell et al. 2006); in Deutschland vorkommende Erreger im Handbuch für Infektionskrankheiten: „Control of communicable diseases manual“ (Heymann 2015).

Um nun der Fülle von Erregern eine Reihen- bzw. Rangfolge (Priorisierung) zu geben, wurden zunächst 12 Kriterien festgelegt, die die Krankheitslast, die epidemiologische Dynamik, Erkenntnis- und Informationsbedarf sowie potentielle Gesundheitsgewinn bezüglich eines Erregers beschreiben (Robert Koch-Institut (RKI) 2008), (Robert

Koch-Institut (RKI) 2011). Die Kriterien wurden im Jahr 2011 von 86 Experten, davon 14 aus dem RKI und 72 externe, gewichtet und eine Liste der Erreger in vier Prioritätsgruppen erstellt. Diese Prioritätsgruppen 1 bis 4 stellen die abgestufte Vorrangigkeit der Erreger von hoch zu niedrig dar. Die Prioritätsgruppen werden auf den folgenden Seiten dargestellt.

1.7.2 Analyse der Übertragungswege priorisierter Infektionen

Die Liste der priorisierten Infektionserreger des RKI wird im Folgenden um ihre Eigenschaften der Infektionsübertragungswege bzw. -ketten erweitert, um eine Bewertung in Bezug auf eine mögliche bauliche Infektionsstrategie aufbauen zu können. Die Liste des RKI enthält nur die Erregerarten, die für Infektionen verantwortlich sind, daher wurde die Liste zum besseren Verständnis des Weiteren um die entsprechenden Erkrankungen und erweiterten Anmerkungen zum Übertragungsweg ergänzt. Die folgenden vier Tabellen, diese entsprechen den priorisierten Erregergruppen des RKI, sind wie folgt aufgebaut. In der ersten Spalte nach den priorisierten Erregern, in der zweiten Spalte die mit dem Erreger zusammenhängenden Infektionskrankheiten, in den nächsten Spalten folgen die direkten und indirekten Übertragungswege und schlussendlich in der letzten Spalte noch erweiterte Anmerkungen zum Übertragungsweg. In der letzten Reihe werden noch die möglichen Übertragungswege der priorisierten Gruppen aufsummiert.

Erläuterung zu den Übertragungswegen der folgenden Tabellen

- (1) Tröpfcheninfektion: Beim Husten, Niesen und Sprechen werden keimhaltige Sekrettröpfchen meterweit verbreitet. Die größeren fallen schnell zu Boden; die kleinen ($<4\mu\text{m}$) halten sich stundenlang in der Schwebe
- (2) Direktkontakt: direkter Kontakt mit menschlichen oder tierischen Sekreten und Ausscheidungen (Blut, Speichel, Mutter- und Tiermilch, Stuhl, Urin etc.)
- (3) Genitalkontakt: Geschlechtsverkehr, Geburtsvorgang
- (4) Vehikel: Kontaminierte Gegenstände oder Teile der Umwelt (z. B. Kleidung, Besteck, Wasser, Milch, Nahrungsmittel, Blut, Plasma, parenterale Lösungen, chirurgische Instrumente), hier differenzieren nach bautechnischen Kriterien
- (5) Luftgetragene Partikel, aerogene Mikroorganismen
- (6) Vektor: Insekten, Mücken, Läuse, Zecken etc.
- (7) Iatrogen: Hygienefehler bei Verletzungen der äußeren Schicht des Menschen durch z. B. Rasieren, Akupunktur, Ohrlochstechen, Maniküren, Tätowieren etc.

ANALYSE RELEVANTER BAUFAKTOREN BEI DER INFEKTIONSÜBERTRAGUNG

Erreger mit höchster Priorität: 76 bis 100 Punkte (n = 26)	Erkrankung	Übertragung							Anmerkungen zum Übertragungsweg
		direkt			indirekt				
		Tröpfchen (1)	Direktkontakt (2)	Genital (3)	Veikel (4)	Luftgetragen (5)	Vektor (6)	Iatrogen (7)	
1.1	Campylobacter spp.		X		X				Direktkontakt möglich, Lebensmittel und kontaminiertes Wasser
1.2	Chlamydia trachomatis		X	X	X				Sexualkrankheit, aber auch perinatale (bei der Geburt) Ansteckung möglich
1.3	Clostridium difficile		X		X				Toiletten, Türklinken, Griffe oder Handläufe
1.4	Escherichia coli, Shigatoxin produzierend (STEC/HUS)		X		X				Lebensmittel, verunreinigtes Trink- und Badewasser
1.5	Escherichia coli (nicht darmpathogen)		X		X				Lebensmittel, verunreinigtes Trink- und Badewasser
1.6	Enterobacter spp.		X		X				kontaminierte intravenöse Flüssigkeiten durch Blutprodukte, kontaminierte Stethoskope, Endoskope und Handkontakt Pflegepersonal; Lebensmittel
1.7	Enterococcus spp.		X		X				
1.8	(invasive Erkrankungen) Hantavirus					X		X	auf den Menschen erfolgt die Übertragung durch das Inhalieren von virushaltigen Aerosolen wie z.B. durch aufgewirbelten Staub; durch Bisse oder den Kontakt von verletzten Hautregionen mit kontaminierten Materialien durch z.B. Staub, Böden; Übertragung durch Lebensmittel, die mit Ausscheidungen infizierter Nagetiere kontaminiert wurden
1.9	Helicobacter pylori		X		X				Übertragungsweg des Erregers ist bis heute nicht geklärt. Es deutet darauf hin, dass er sich auf fäkal-oralen Weg verbreitet; Das Bakterium wird über den Stuhl ausgeschieden und durch Wasser oder verschmutzte Nahrung wiederaufgenommen
1.10	Hepatitis-B-Virus			X	X				Blut, Gewebe
1.11	Hepatitis-C-Virus			X	X				Blut, Gewebe
1.12	Humanes Immundefizienz-Virus (HIV)			X	X				gemeinsamen Verwendung von Injektionsutensilien / durch Schnitt- oder Stichverletzungen an kontaminierten Instrumenten
1.13	Influenzavirus	X			X	X			
1.14	Klebsiella spp.		X		X				über den Kontakt mit kontaminierten Oberflächen; wurde auch in Beatmungsgeräten nachgewiesen, die mehrmals desinfiziert worden waren
1.15	Legionella pneumophila	X			X	X			Warmwasserleitung, Klimaanlage
1.16	Masernvirus	X	X			X			
1.17	Mycobacterium tuberculosis	X				X			
1.18	Neisseria meningitidis	X							
1.19	Pseudomonas spp.				X				Wasser, Lebensmittel
1.20	Respiratorisches Synzytial Virus (RSV)	X			X				direkt Tröpfchen + indirekt über kontaminierte Gegenstände, Oberflächen, Hände
1.21	Salmonella spp. (außer S. Typhi und S. Paratyphi)				X				Lebensmittel; abgestandenes Wasser (z.B. in lange nicht genutzten Wasserspendern oder Duschschläuchen); verunreinigtes Oberflächenwasser
1.22	Staphylococcus aureus (einschl. MRSA)		X		X				Überwiegend über Hände z.B. Pflege- und ärztlichen Personal
1.23	Staphylococcus epidermidis/Koagulase-negative Staphylokokken		X		X			X	
1.24	Streptococcus pneumoniae	X				X			
1.25	Streptokokken (andere)	X			X	X			
1.26	Varicella-Zoster-Virus (VZV)	X			X				
		9	12	4	21	7	0	2	Summe Anzahl Übertragungswege

Tabelle 1: Liste der Erreger der Prioritätsgruppe 1 nach (Robert Koch-Institut (RKI) 2011) erweitert um ihre Übertragungswege

ZUSAMMENSPIEL INFEKTIONSAUSBREITUNG UND BAULICHE ASPEKTE

Erreger mit hoher Priorität: 51 bis 75 Punkte (n = 39)	Erkrankung	Übertragung							Anmerkungen zum Übertragungsweg
		direkt			indirekt				
		Tröpfchen (1)	Direktkontakt (2)	Genital (3)	Vehikel (4)	Luftgetragen (5)	Vektor (6)	Iatrogen (7)	
2.1	Acinetobacter spp.						X		Boden, Trinkwasser, Oberflächengewässern, Abwässern sowie in verschiedenen Nahrungsmitteln; Möglichkeit einer Übertragung über Vektoren (Bettwäsche, Instrumente, Beatmungsgeräte, Luftbefeuchter sowie das Personal); die Übertragungswege sind z.T. unklar
2.2	Adenovirus		X		X				Besonders Infektionen an Augen werden übertragen / Oberflächen wie Türgriffe, Handläufe oder Armaturen
2.3	Arboviren						X		Antropoden, Zecken, Mücken usw.
2.4	Aspergillus spp.	X				X			
2.5	Brucella spp.				X				Übertragung hauptsächlich über kontaminiertes Wasser, bzw. Lebensmittel
2.6	Corynebacterium ulcerans und Corynebacterium pseudotuberculosis	X			X	X			
2.7	Prionen (z. B. Creutzfeldt-Jakob-Krankheit)				X				Blut und Gewebe; Verzehr kontaminierter Lebensmittel
2.8	Krim-Kongo-Hämorrhagisches-Fieber-Virus	X					X		Übertragung erfolgt hauptsächlich über Zecken; Mensch-zu-Mensch-Übertragung erfolgt über Tröpfchen
2.9	Cryptosporidium parvum/hominis				X				kontaminiertes Trinkwasser
2.10	Denguevirus						X		Übertragung des Denguevirus erfolgt hauptsächlich über die Aedes-Mücke
2.11	FSME-Virus und andere von Zecken übertragene Meningoenzephalitisviren						X		Übertragung über Zecken
2.12	Ebolavirus und Marburgvirus		X		X				Marburgvirus Übertragung vermutlich über engen Kontakt mit dem Blut und Körperflüssigkeiten infizierter Personen; Ebolavirus Übertragung über direkten Kontakt mit Ebola-erkrankten oder an Ebola verstorbenen Personen oder deren Körperflüssigkeiten, wie z. B. Blut
2.13	Enteroviren (einschl. Echoviren)	X			X				Trinkwasser, Schwimmbäder oder Seen
2.14	Epstein-Barr-Virus (HHV-4)	X	X	X	X				
2.15	Giardia lamblia				X		X		Wasser, Lebensmittel, selten über Fliegen
2.16	Haemophilus influenzae	X				X			
2.17	Hepatitis-A-Virus		X		X				kontaminiertes Trinkwasser; kontaminierte Lebensmittel; Schmierinfektion;
2.18	Hepatitis-D-Virus				X				Blut bzw. Gewebe
2.19	Hepatitis-E-Virus		X		X				kontaminierte Lebensmittel oder Trinkwasser; selten: enges Zusammenleben mit Infizierten
2.20	Humanes Papillomvirus (HPV)		X	X	X			X	Seltener Übertragung durch gemeinsame Nutzung Trinkgläser, Handtücher, Zahnbürsten, Rasierer
2.21	Lassa-Virus	X	X	X	X	X			überwiegend durch Tröpfchen oder Luftpartikel; direkten oder indirekten Kontakt mit kontaminierten Gegenständen oder Personen; kontaminiertes Wasser und Lebensmittel
2.22	Listeria monocytogenes				X				Direktkontakt mit infizierten Tieren; kontaminierte Lebensmittel - vor allem Milchprodukte; unbehandeltes Gemüse und Obst; Produkte aus rohem Fleisch
2.23	Microsporium und Trichophyton spp.		X		X				über direkten oder indirekten Kontakt mit kontaminierten Personen oder Gegenständen
2.24	Mumpsvirus	X				X			
2.25	Mycoplasma spp.		X		X				
2.26	Neisseria gonorrhoeae		X	X	X				
2.27	Norovirus		X		X				Übertragung fäkal-oral (z.B. direkter Handkontakt mit kontaminierten Oberflächen); Tröpfchen; kontaminierte Speisen; kontaminiertes Wasser bzw. Getränke
2.28	Parainfluenzaviren	X				X			
2.29	Kopf- und Kleiderlaus						X		
2.30	Poliovirus		X		X				
2.31	Rabiesvirus				X				Infektionsweg führt fast immer über einen Biss eines Tieres
2.32	Rotavirus		X		X				besonders durch Schmierinfektion, aber auch durch kontaminiertes Wasser und Lebensmittel übertragen
2.33	SARS-Coronavirus (SARS-CoV)	X				X			
2.34	Toxoplasma gondii					X			hauptsächlich über kontaminiertes Wasser, bzw. Lebensmittel
2.35	Variolavirus	X	X		X	X			
2.36	Andere Hämorrhagische-Fieber-Viren (Chikungunya, Rift Valleyfieber)						X		
2.37	West-Nil-Virus						X		
2.38	Gelbfiebervirus						X		
2.39	Yersinia enterocolitica und pseudotuberculosis		X		X				Gegenstände, Wasser, Lebensmittel
		11	15	4	25	8	10	1	Summe Anzahl Übertragungswege

Tabelle 2: Liste der Erreger der Prioritätsgruppe 2 nach (Robert Koch-Institut (RKI) 2011) erweitert um ihre Übertragungswege

ANALYSE RELEVANTER BAUFAKTOREN BEI DER INFEKTIONSÜBERTRAGUNG

Erreger mit hoher Priorität: 26 bis 50 Punkte (n = 45)		Erkrankung	Übertragung							Anmerkungen zum Übertragungsweg
			direkt			indirekt				
			Tröpfchen (1)	Direktkontakt (2)	Genital (3)	Vehtikel (4)	Luftgetragen (5)	Vektor (6)	iatrogen (7)	
3.1	Bacillus anthracis	Milzbrand (Haut, Darm, Lunge)		X		X	X			Hautkontakt zu an Milzbrand erkrankten bzw. verendeten Tieren oder zu kontaminierten tierischen Rohstoffen wie z.B. Fellen, an denen Sporen des Erregers haften; wird infiziertes und nicht ausreichend durchgegartes Fleisch gegessen, kann die seltene Form des Darmmilzbrandes entstehen
3.2	Bacillus cereus	Durchfall, Erbrechen, selten milzbrandähnliche Symptome				X				Erreger überleben Pasteurisierungsprozess
3.3	Bartonella quintana	Fünf-Tage-Fieber, bazilläre Angiomatose						X		Mensch-zu-Mensch-Übertragung durch die Kleiderlaus (Pediculus humanus corporis)
3.4	Bordetella pertussis	Keuchhusten	X							
3.5	Borrelia burgdorferi	Lyme-Borreliose						X		Übertragung durch Zeckenbiss
3.6	Burkholderia cepacia	Abnahme der Lungenfunktion				X				Grundwasser, Erdboden
3.7	Burkholderia pseudomallei	Melioidose				X				Grundwasser, Erdboden
3.8	Burkholderia mallei	Melioidose				X				Grundwasser, Erdboden
3.9	Candida spp.	Pilzinfektion	X	X	X	X	X			
3.10	Chlamydia psittaci	Ornithose		X			X			
3.11	Citrobacter spp.	Harnwegsinfektionen, Sepsen und Wundinfektionen	X	X		X			X	direkter oder indirekter Kontakt mit kontaminierten Personen oder Gegenständen.
3.12	Clostridium botulinum	Lebensmittelvergiftung, Lähmungserscheinungen		X		X				Lebensmittel, Aas, Boden, Wasser
3.13	Clostridium perfringens	Nekrose, Gewebeabbau, Gasbrand, Lebensmittelvergiftung				X	X		X	
3.14	Clostridium tetani	Tetanuserkrankung		X		X				Erdboden, Ausscheidungen von Rindvieh
3.15	Coronavirus	Atemwegserkrankungen	X	X		X		X		Lebensmittel, Direktkontakt zu Tieren, Mensch-Mensch
3.16	Corynebacterium diphtheriae	Pseudomembran auf Atemweg und Organen, Hautinfektionen	X		X					
3.17	Coxiella burnetii	Q-Fieber		X		X	X			Vektor-Zecken, infizierter Staub, infizierte Exkrete
3.18	Cryptococcus spp.	Kryptokokken-Hirnhautentzündung		X			X			Inhalation der hitze- und austrocknungsresistenten Erreger
3.19	Cytomegalievirus (HHV-5)	Herpesinfekt, grippaler Infekt, Lungenentzündung, Leberentzündung	X	X	X					Tröpfchen; Schmierinfektion über Blut, Speichel, Muttermilch, Zervixsekret und Samenflüssigkeit
3.20	Escherichia coli	Gastroenteritis, Harnwegsinfektionen		X		X				kontaminierte Lebensmittel oder Trinkwasser
3.21	Francisella tularensis	Grippe-symptome, Pneumonie, Organversagen		X		X	X	X		
3.22	Herpes-simplex-Virus 1	Lippenherpes, Genitalherpes, Mundfäule	X	X	X					vertikale Übertragung, Transfusion, Sexualkontakt
3.23	Herpes-simplex-Virus 2	Lippenherpes, Genitalherpes, Mundfäule	X	X	X					vertikale Übertragung, Transfusion, Sexualkontakt
3.24	HHV-8	Kaposi-Sarkom, Lymphome	X	X	X					vertikale Übertragung, Transfusion, Sexualkontakt
3.25	Humanes T-Zellleukämie-Virus	Humanes T-Zellleukämie-Virus	X	X	X	X				vertikale Übertragung, Transfusion, Sexualkontakt
3.26	Leishmania spp.	Leishmaniose						X		weibliche Sandmücken
3.27	Leptospira interrogans	Weil-Krankheit, Batavia-Fieber		X		X				Kontaktzoonose
3.28	Mycobacterien	Lungenerkrankungen	X							
3.29	Parvovirus B 19	grippeähnliche Symptome	X	X		X				
3.30	Plasmodium spp.	Malaria				X		X		Mücken, aber auch Vögel, Reptilien etc. ferner auch durch Bluttransfusionen
3.31	Rhinoviren	Schnupfen, Bronchitis, Kopfschmerzen	X	X						häufig: kontaminierte Hände
3.32	Rickettsia prowazekii, typhi und Orientia tsutsugamushi	diverse Fieberformen						X		Zecken, Milben, Flöhe, Läuse
3.33	Rickettsia spp.	diverse Fieberformen						X		Zecken, Milben, Flöhe, Läuse
3.34	Rubellavirus	Röteln	X							
3.35	Salmonella Paratyphi und Salmonella Typhi	Typhus, Lebensmittelvergiftung		X		X				
3.36	Sarcoptes scabiei	Krätze		X		X				Eindringen der Krätzmilbe in die Haut
3.37	Shigella spp.	Durchfall				X				
3.38	Stenotrophomonas (Pseudomonas) maltophilia	schwere Infektionen, u.a. Atemwegsinfektionen	X	X		X	X		X	
3.39	Treponema pallidum	Syphilis	X	X	X	X				zu 4: selten auch durch kontaminierte Gegenstände
3.40	Trichinella spiralis	Trichinellose				X				häufig in kontaminiertem Schweinefleisch
3.41	Trichomonas vaginalis	Trichomoniasis	X	X	X					insbesondere Sexualkontakt
3.42	Trypanosoma brucei gambiense und brucei rhodesiense	afrikanische Schlafkrankheit						X		Infektion durch Stechmücken
3.43	Vacciniavirus	Pockenerkrankungen						X		Nagetiere als Vektoren
3.44	Vibrio cholerae	Cholera, Reisdurchfall				X				kontaminierte Lebensmittel, Wasser
3.45	Nicht-Cholera-Vibrionen: V. parahaemolyticus, V. vulnificus und V. cholerae (außer O1 und O139)	Gastroenteritis, Sepsis				X				kontaminierte Lebensmittel, Wasser
			17	24	9	26	8	10	3	Summe Anzahl Übertragungswege

Tabelle 3: Liste der Erreger der Prioritätsgruppe 3 nach (Robert Koch-Institut (RKI) 2011) erweitert um ihre Übertragungswege

Erreger mit hoher Priorität: 0 bis 25 Punkte (n = 17)		Erkrankung	Übertragung							Anmerkungen zum Übertragungsweg
			direkt			indirekt				
			Tröpfchen (1)	Direktkontakt (2)	Genital (3)	Vehtikel (4)	luftgetragen (5)	Vektor (6)	iatrogen (7)	
4.1	Aktinomyzeten	Aktinomykose							X	Eintritt in verletzte Mundschleimhaut
4.2	Astrovirus	Gastroenteritis				X				kontaminierte Lebensmittel, Trinkwasser
4.3	Chlamydia pneumoniae	Atemwegsinfektion, Lungenentzündung	X							
4.4	Coxsackievirus	Erkältung, Meningitis, Myokarditis	X	X	X	X				
4.5	Cyclospora cayetanensis	Durchfall				X				Trinkwasser, kontaminierte Lebensmittel
4.6	Entamoeba histolytica	Amöbenruhr, Zysten im Darm				X				Trinkwasser, kontaminierte Lebensmittel
4.7	Fungi	Mykosen	X		X	X	X			
4.8	Helminthen (Trematoden)	Tumor der Gallenwege, Hirnschäden				X				Wurmbefall
4.9	Helminthen (Nematoden)	Durchfall, Fieber, Myokarditis, Entzündungen		X		X		X	X	Wurmbefall
4.10	Helminthen (Bandwürmer)	Durchfall, Fieber, Myokarditis, Entzündungen		X		X		X	X	Wurmbefall
4.11	HHV 6 und 7 (Roseolovirus)	Drei-Tage-Fieber	X							Kindersalter meist vor dem zweiten Lebensjahr, Latenzvirus
4.12	Histoplasma capsulatum	Erkältung, Fieber, Husten					X			Aufwirbelung aus dem Erdboden, Einatmung
4.13	Klebsiella granulomatis	Donovanosis			X					enger Sexualkontakt
4.14	Molluscipoxvirus	Dellwarzen, Pockenerkrankungen	X	X	X	X				
4.15	Mycobacterium leprae	Lepra, Gewebeauflösung	X	X	X					
4.16	Pneumocystis jiroveci	interstitielle Lungenentzündung	X	X			X			
4.17	Unbekannter Erreger des Kawasaki-Syndroms	Fieber, systemische Erkrankung, Schwellung der Lymphknoten	X							
4.18	Yersinia pestis	Lungen- und Beulenpest	X	X				X		Auswurf, Rattenfloh
			9	7	5	9	3	3	3	Summe Anzahl Übertragungswege

Tabelle 4: Liste der Erreger der Prioritätsgruppe 4 nach (Robert Koch-Institut (RKI) 2011) erweitert um ihre Übertragungswege

1.7.3 Auswertung der Verteilung priorisierter Infektionsübertragungswege

Für die bauliche Infektionsprävention ist es von Vorteil zu wissen, ob es bestimmte Übertragungswege gibt, die häufiger in Zusammenhang mit Infektionen stehen, um Präventionsstrategien entsprechend auszurichten. Dazu werden im Folgenden die erfassten Übertragungswege der vom RKI priorisierten Erregerlisten auf ihre Häufigkeit je nach Übertragungsart numerisch erfasst.

Prioritätsgruppe	Multiplikator	Übertragung						
		direkt			indirekt			
		Tröpfchen	Direktkontakt Berührung	Genital	Vehtikel	Luftgetragen	Vektor	iatrogen
1		9	12	4	21	7	0	2
	4	36	48	16	84	28	0	8
2		11	15	4	25	8	10	1
	3	33	45	12	75	24	30	3
3		17	24	9	26	8	10	3
	2	34	48	18	52	16	20	6
4		9	7	5	9	3	3	3
	1	9	7	5	9	3	3	3
Summe einzeln	absolut	112	148	51	220	71	53	20
	Prozent	17%	22%	8%	33%	11%	8%	3%
Summe direkt/ indirekt	absolut	311			364			
	Prozent	46%			54%			
		675						

Tabelle 5: Auswertung Infektionsübertragungswege

Tabelle 5 zeigt die aufsummierten Erregerwege nach Prioritätsgruppe nach RKI in absoluten und prozentualen Werten. Dabei wird die Summe des Übertragungsweges pro priorisierter Liste zusätzlich mit einem Faktor multipliziert, um der Höhe der Priorisierungsgruppe Rechnung zu tragen. Selbst bei Wegfall des Multiplikators bleiben die Ergebnisse in Summe nahezu identisch, da sich in allen Gruppen die Übertragungswege ebenfalls nahezu gleich verteilen.

Es ist festzuhalten, dass bei der Auswertung die Möglichkeit der unterschiedlichen Übertragungswege errechnet wird. In welcher Häufigkeit diese im Vergleich genutzt werden, kann hierdurch nicht ausgedrückt werden. Dies soll durch die zuvor durchgeführte Priorisierung ausgeglichen sein.

Auffällig bei der Auswertung ist, dass die übergeordneten Infektionswege mit 54% der indirekten und 46% der direkten Übertragungen nahezu gleichwertig vertreten sind. Höchste Werte erreichen in beiden Gruppen jeweils der Direktkontakt bzw. die Berührung (22%) sowie der indirekte Kontakt über Vehikel bzw. kontaminierte Oberflächen oder Gegenstände (33%). In Summe finden somit über die Hälfte der Erregerübertragungen über die Direktberührung von Mensch zu Mensch und den indirekten Kontakt über Oberflächen (Vehikel) statt. Nahezu ein Viertel der Übertragungen finden über die Luft statt, mit 17% Tröpfchen und 11% luftgetragenen Partikeln. Vektor- oder genitalübertragende Infektionswege kommen mit einer Möglichkeit von jeweils 8% vor.

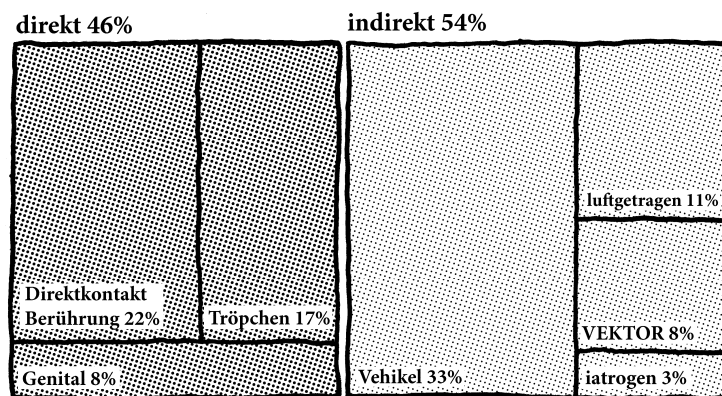


Abbildung 4: Diagramm der Auswertung der Infektionsübertragungswege

1.7.4 Ableitung der relevanten baulichen Komponenten

Nachdem nun die Möglichkeiten der Infektionsübertragungswege und ihre Gewichtung erfasst wurde, sollen nun die baulichen Komponenten, die eine Infektionsausbreitung reduzieren und im besten Fall unterbrechen können, abgeleitet werden. In Tabelle 6 werden dazu die einzelnen Übertragungswege um die Akteure in der Infektionskette ergänzt. Des Weiteren wird die entsprechende Form einer Unterbrechung bzw. Optimierung aufgeführt. Im letzten Schritt zeigt die Tabelle die zwei möglichen Baukomponentengruppen, die für die Reduzierung der Infektionsübertragung möglich sind. Auf der einen Seite haben wir die **technikoptimierte Bauteilkomponente**. Man könnte sie auch als statische bzw. starre oder **baukonstruktive** und technische **Komponente** bezeichnen. Dazu gehören Oberflächen, Materialien, technische Infrastrukturen wie

Wasser-, Kühlungs- oder Lüftungsanlagen. Auf der anderen Seite haben wir als **bau-funktionale Baukomponente** das **prozessoptimierte räumliche Layout**. Bei dieser Komponente spielt der Faktor Zeit im räumlich-zeitlichen Sinne die entscheidende Variante. Hierbei geht es bei der Planung des Layouts von Gebäuden darum, die eigentliche Nutzung zu berücksichtigen.

Infektionsübertragungsweg				Akteure	Unterbrechung / Optimierung	Baukomponente		
						Optimierung bautechnisch-konstruktive Komponente	Optimierung baufunktional-prozessuale Komponente	
Direkt	46%	17%	Tröpfchen	Lebewesen-Lebewesen	Distanz / Separation	Material	Prozessoptimiertes Layout für distanzwahrende Raumnutzung / Entflechtung von Wegeüberlagerungen / Flächenzuweisung / Barrieren	
		22%	Direktkontakt / Berührung	Lebewesen-Lebewesen	Distanz / Separation	Material	Prozessoptimiertes Layout für distanzwahrende Raumnutzung / Entflechtung von Wegeüberlagerungen / Flächenzuweisung / Barrieren	
		8%	(Genitalkontakt)					
Indirekt	54%	33%	Vehikel	Oberflächen	Lebewesen-Material	Distanz / optimierte Oberflächen	Material	Prozessoptimiertes Layout für oberflächenkontaktlose Raumnutzung
				Wasser	Lebewesen-Wasser	optimierte Versorgung	TGA Infrastruktur	Barrieren
				Nahrungsmittel	Lebewesen-Nahrungsmittel	optimierte Warenkette	TGA Kühlung	Prozessoptimiertes Layout für gerichtete Warenkette
				(Blut/ Plasma/ Besteck)				
		11%	Luftgetragene Partikel	Lebewesen-Luft	Luftstrom kontrollieren	TGA Lüftungsanlage	Barrieren	
		8%	Vektor	Lebewesen-Insekt	Vektorweg kontrollieren	TGA Lüftungsanlage	Barrieren	
		3%	(Iatrogen)					

Tabelle 6: Zusammenspiel Infektionskette und Baukomponenten

Iatrogene und genitalkontaktverursachte Infektionen werden bei der Betrachtung vernachlässigt, da diese nicht über bauliche Maßnahmen reduziert werden können. Die Tabelle zeigt, dass die Kontaktkette, die über Tröpfchen, Berührung oder Oberflächen zustande kommt, im Wesentlichen über die Vermeidung des Kontakts in Form einer distanzwahrenden und kontaktlosen Raumnutzung sowie der Entflechtung von Wegeüberlagerungen realisiert werden kann. Die techniko-optimierten Bauteilkomponenten kommen im Bereich der indirekten Infektionsübertragung über Wasser, Nahrungsmittel, luftgetragene Partikel oder Vektoren bzw. Insekten zum Einsatz. Diese techniko-optimierten Bauteilkomponenten sollen mithilfe optimierter Materialien und Gebäudetechnik eine verbesserte Versorgung mit Wasser, Luft und Kühlung im Sinne einer Infektionsprävention leisten. Im Bereich der Nahrungsmittel können ebenfalls prozessoptimierte räumliche Layouts mit gerichteten Warenströmen eine optimierte Versorgung bereitstellen. Eine detailliertere Betrachtung der Baukomponenten der Infektionsprävention folgt in Kapitel 2.

2. Baukomponenten der Infektionsprävention

Nachdem in Kapitel 1 die übergeordneten zwei Ansätze von Baukomponenten, die zur Infektionsprävention genutzt werden können, über die Analyse des priorisierten Übertragungsweges abgeleitet wurden (s. Abbildung 5), sollen diese Baukomponenten im Folgenden weiter differenziert beschrieben werden.

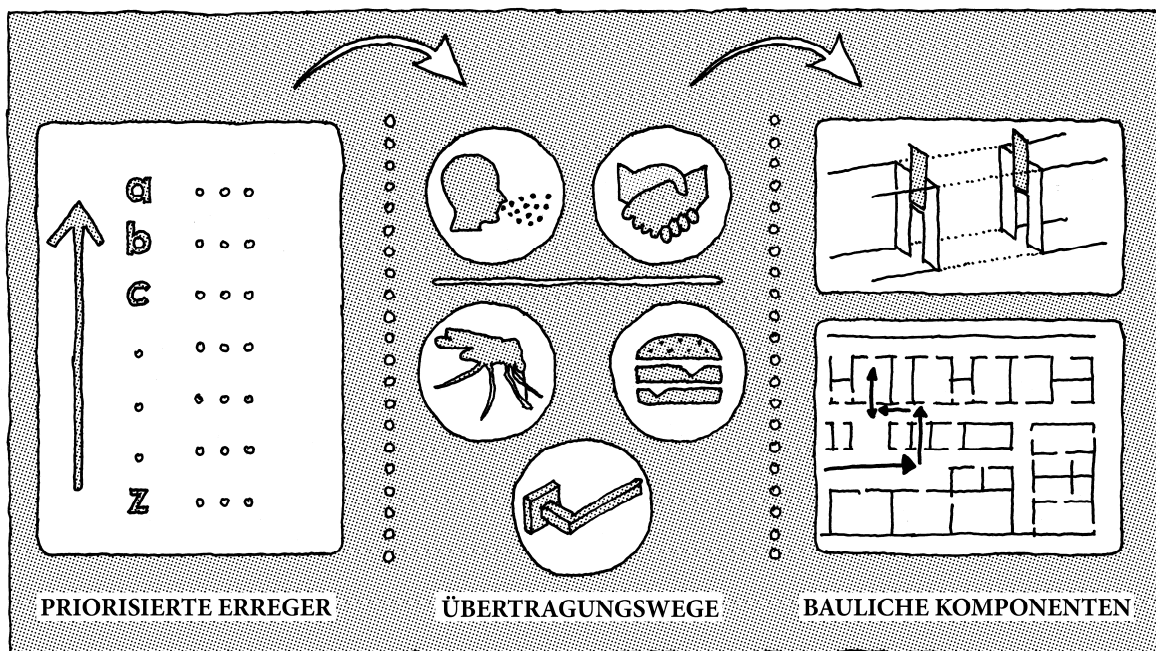


Abbildung 5: Herleitung der infektionspräventiven Baukomponenten nach priorisierten Erregerarten und Übertragungsweg

Die **bautechnisch-konstruktive Komponente** kann man als die eigentliche *Hardware* bezeichnen. Mit ihren konstruktiven Baumaterialien und technischen Gebäudeanlagen stellen sie die physischen Grundlagen des Bauens dar. Die **baufunktional-prozessuale Komponente** wird über die eigentliche Nutzung des Raumes definiert. Hierbei werden die Ablaufprozesse durch verbesserte Planung in Entwurf und Layout optimiert. Beide Komponenten bedingen einander und müssen in Kombination betrachtet werden. Ein optimiertes Material ist beispielhaft nur dort sinnvoll eingesetzt, wo die Ablaufprozessbetrachtung dies erforderlich macht. Auf der anderen Seite kann z.B. eine infektionsprozessunterbrechende Separierung von Patienten nur durch den Einsatz von bautechnisch-konstruktiven Schleusen erfolgen.

Im weiteren Verlauf dieser Arbeit sollen die Baukomponenten auf ihre Optimierungsmöglichkeiten überprüft werden. Ein Überblick zu bereits **etablierten Methoden zur**

Infektionsunterbrechung im Bereich des Bauens soll den Blick für weiteres Optimierungspotential oder möglicher Lücken aufzeigen.

2.1 Bautechnisch-konstruktive Komponenten

Zu den bautechnisch-konstruktiven Komponenten in der Infektionsprävention zählen die Einzelkomponenten aus denen der gebaute Raum zusammengesetzt und nutzbar gemacht wird. Dies sind die klassischen Baumaterialien wie Holz, Stein, Beton, Glas etc. sowie die technischen Gebäudekomponenten wie z. B. zur Wasser-, Luft- oder Kühlungsversorgung. Diese einzelnen Teile werden wiederum über die Planung und den Entwurf der Baukonstruktion zusammengefügt. Die bautechnisch-konstruktiven Komponenten werden im Bereich der indirekten Infektionsübertragung eingesetzt. Hierbei sollen sie die indirekte Vehikel-Kontaktübertragung durch optimierte Oberflächen oder durch verbesserte Ver- und Entsorgungssysteme reduzieren.

2.1.1 Bautechnik - Bauteile und Gebäudetechnik

Der Begriff der Bautechnik wird häufig als Sammelbegriff für alle technisch-konstruktiven Aspekte des Bauens genutzt. Dabei beinhaltet der Begriff Bautechnik eine Vielzahl von Fachbereichen wie z. B. Tragwerksplanung, Baustatik, Grundbau und Bodenmechanik, Geotechnik, Bauakustik oder Verkehrswegebau. Bezogen auf die Übertragungswege von Infektionen zeigt Tabelle 6, dass in Bezug auf die indirekte Übertragung Themen wie Oberflächen, Wasser, Luft, Nahrungsmittel und Vektorenwege relevant sind. Im Bereich der Bautechnik haben wir daher Überschneidungen bei dem Themenfeld **Oberflächen** in der Baustofflehre, auch Baustoffkunde oder **Baustofftechnologie** genannt. Bezogen auf die Übertragungswege **Luft, Wasser, Nahrungsmittel und Vektoren** haben wir eine Entsprechung in der **Gebäudetechnik**, auch Technische Gebäudeausrüstung (TGA) genannt.

Im Bereich der Oberflächen der Baustofftechnologie sind zwei grundsätzliche Fragestellungen in Bezug auf die Infektionsübertragung an das Material zu stellen. Zum einen, wie lange überleben Mikroorganismen bzw. Erreger auf der Oberfläche; hat die **Oberflächenbeschaffenheit** etwas damit zu tun und kann sie den Erreger sogar inaktivieren? Auf der anderen Seite, wie müssen Oberflächeneigenschaften definiert werden, die je nach Anforderung **mechanischen, physikalischen und chemischen Einwirkungen** standhalten, um einen bestimmten **Hygienestandard** zu erreichen? Die erste Frage zielt darauf ab, ob z. B. die Rauigkeit des Oberflächenmaterials die Haftung des Erregers beeinflusst oder die chemische Zusammensetzung des Materials einen Einfluss auf die Überlebensdauer des Erregers hat. Die zweite Frage beschäftigt sich mit der Robustheit des Materials, dass eine bestimmte Nutzungs- und Reinigungseinwirkung verkraften muss, ohne z. B. durch Chemikalien spröde zu werden.

Im Rahmen des Forschungsprojekts HYBAU+ der TU Braunschweig und der Charité Berlin (Dreßler et al. 2017) wurde diesen Fragestellungen bezogen auf den Krankenhausbau mit Versuchsanordnungen zur Besiedlungsneigung von Erregern auf Oberflächen und zur Reinigbarkeit unterschiedlicher Materialien nachgegangen. Zusammenfassend wurde dabei festgestellt, dass neben regelmäßiger Flächendesinfektion ebenso die Auswahl geeigneter Materialien die Infektionsübertragung reduzieren kann. Die Datenlage zum Überleben (Persistenz) bestimmter Mikroorganismen auf unterschiedlichen Materialien ist allerdings inkonsistent. Schon im Vorfeld der Untersuchungen war der Einfluss von Oberflächeneigenschaften weitgehend unerforscht. Der Einfluss des Materials auf die Persistenz wurde über die Verläufe der verbleibenden Keimzahlen bei den Besiedlungsversuchen über die Inkubationszeit bestätigt. Im beobachteten Parameterbereich der Versuche konnte festgestellt werden, dass eine hohe Rauheit der Oberfläche zu einer niedrigeren Persistenz des Erregers führt. Die Untersuchungen haben aber auch gezeigt, dass die Anwendung der gewonnenen Erkenntnisse zur Auswahl optimaler Materialkomponenten für bestimmte Bereiche wie Wand, Decke, Boden oder Ausstattungsgegenstände weitere Untersuchungen erfordern, da die Oberflächeneigenschaften der Materialien auch die Gebrauchseigenschaften bestimmen.

Die **Gebäudetechnik** oder auch Technische Gebäudeausrüstung ist die zweite bautechnische Disziplin, die auf indirekte Übertragungswege reagieren kann. Sie ist ein Teilgebiet der Versorgungstechnik. Die Versorgungstechnik bezieht alle Gebäudetypen und darüber hinaus auch alle Anlageformen mit ein. Aufgabe der Gebäudetechnik, auch im Sinne der baulichen Infektionsprävention, ist, das Gebäude für seine Nutzungsbestimmung entsprechend auszustatten. Dies sind auf der einen Seite die klassischen notwendigen Komponenten wie Kanalisation, Stromversorgung oder Beleuchtung. Auf der anderen Seite beschreibt die Gebäudetechnik aber auch zusätzliche Anlagen wie z. B. die Automatisierung von Arbeitsvorgängen im Gebäude. Teilgebiete der Gebäudetechnik sind z. B. die Aufzugstechnik, Gebäudeautomation, Elektrotechnik sowie die Wärme- bzw. Heiztechnik.

Bezogen auf die indirekte Infektionsübertragung finden die Themen (nach Tabelle 6) Wasser in der **Sanitärtechnik**, Luft und Vektor in der **Raumluftechnik** und **Reinraumtechnik** sowie das Thema Nahrungsmittelketten in der **Kältetechnik** bzw. Kühlung ihre Entsprechungen. Dabei geht es nicht nur um die stoffliche Versorgung der Gebäude mit Luft oder Wasser, sondern ebenso wichtig mit der Entsorgung aller im Gebäude anfallenden Abfallprodukte wie Abwasser oder Müll. Die auf diese bautechnischen Komponenten optimierte Planung der Gebäudetechnik kann die Infektionsübertragung reduzieren.

2.1.2 Baukonstruktion - Planung, Entwurf, Layout

Die Baukonstruktion beschreibt zwei unterschiedliche Phasen des Bauens. Auf der einen Seite beschreibt der Begriff den Konstruktionsprozess, also die Planung, wie die einzelnen Teile des Bauwerks, wie die zuvor beschriebenen Materialien und die Gebäudetechnik, zusammengefügt bzw. konstruiert werden. Auf der anderen Seite beschreibt die Baukonstruktion das fertige Ergebnis, das Gefüge der Bauteile im erstellten Gebäude. Die große Herausforderung liegt in der abgestimmten Planung bzw. Konstruktion der vielen sehr unterschiedlichen technischen Komponenten. Aufgrund ihrer eigenen Komplexität, gerade in den unterschiedlichen Bereichen der Gebäudetechnik, werden immer mehr Spezialisten für diese Technikkomponenten ausgebildet.

Der Architekt muss diese einzelnen Fachplaner koordinieren. In infektionssensiblen Bereichen wie dem Gesundheitsbau müssen die Gebäudetechnik zusätzlich mit den infrastrukturellen Anforderungen der Medizintechnik abgestimmt werden. In neusten Planungen werden diese technischen Anlagen aufgrund ihres immer stärker raumgreifenden Anspruchs mittels 3-D-Visualisierung in BIM (Building-Information-Modeling)-Programmen einer Kollisionsprüfung (clash-detection) unterzogen.

Im kleineren Maßstab der Fügung von Oberflächen bzw. unterschiedlichen Materialien wird ebenfalls der Stellenwert der Baukonstruktion für die Infektionsprävention sichtbar. Die einzelne Oberfläche, wie beispielsweise eine Fliese im Bad, ist in der Gesamtbetrachtung nur so gut wie seine geometrische Planung an der tragenden Konstruktion und seiner Fügung an das Nachbarmaterial. Ist der Untergrund der Fliese uneben, so wird diese zwangsläufig unter Belastung aufspringen und Angriffspunkte für eindringende Erreger bieten. Ebenso ist die Fuge durch ihre hohe Offenporigkeit zwischen zwei benachbarten Fliesen der bestimmende Faktor bei der Infektionsübertragung.

Die Tragwerksplanung als Teil der Baukonstruktion hat Auswirkungen auf die Infektionsprävention durch planerische Maßnahmen wie beispielsweise der Planung von stützenfreien Räumen in behandlungsintensiven Bereichen.

Wie bei der Gebäudetechnik spielt auch bei der Ausführung der geplanten Konstruktion auf der Baustelle, das Zusammenspiel und die Abstimmung unterschiedlicher, in diesem Fall, Gewerke bzw. ausführender Firmen eine entscheidende Rolle. Wird beispielsweise die Unterkonstruktion einer abgehängten Decke von einer Firma A unsachgerecht ausgeführt, kann Firma B diese eigentlich technisch einwandfreie Decke nicht optimal montieren. In der Baukonstruktion ist hier auf eine einfache Gewerke-abgestimmte Planung zu achten. Die Baukonstruktion hat somit Einfluss auf die Infektionsprävention mittels der Auswahl der Gebäudetechnikkomponenten, des verwendeten Materials und seiner Fügung.

2.2 Baufunktional-prozessuale Komponenten

Direkte Infektionsübertragungswege wie die Tröpfcheninfektion oder der Berührungsdirektkontakt können durch Kontaktvermeidung in Form von Distanzwahrung oder Entflechtung von Wegeüberlagerungen bzw. gerichteten Wegeketten erfolgen (s. Tabelle 6). Dem potentiellen Erregerträger sollte dabei eine möglichst kontaktlose bzw. wegegerichtete Raumnutzung durch eine entsprechende ablaufprozessoptimierte Planung ermöglicht werden. Zusätzlich zu dem optimierten **Ablaufprozess** im Gebäude kann auch der eigentliche **Planungsprozess** verbessert werden, um die bauliche Infektionsprävention zu verbessern. Im Bereich des Bauens spricht man hier auch von der *Planung der Planung*.

2.2.1 Ablaufprozessoptimierte Planung in Entwurf und Layout

Da die Infektionsübertragung einen Prozess darstellt, hat sie immer auch eine zeitliche Komponente. Hinzu kommt, dass dieser Übertragungsprozess auch räumlich verortet ist. Egal ob die Infektion von Mensch zu Mensch, Mensch zu Tier, Mensch zu Oberfläche, Mensch zu Wasser bzw. Nahrung etc. stattfindet, die Infektionskette kann immer über die raum-zeitlichen Koordinaten beschrieben werden. Soll eine Infektionsübertragung erst gar nicht stattfinden, so ist der Raum der einzige Faktor zur Optimierung. Grundlage der Planung sind die Analyse der Bewegungsmuster der einzelnen Nutzer bzw. der Prozessabläufe potentiellen Erregerträger wie beispielsweise Nahrungsmittel oder Ver- und Entsorgungsprozesse.

Die naheliegendste Form zur Reduzierung der Infektionsübertragung ist, eine **Distanz** der Akteure von Wirt und potentielltem Erregerempfänger räumlich zu ermöglichen. Eine möglichst interpersonelle- und oberflächenkontakthlose distanzwahrende Raumnutzung ist anzustreben. Will oder muss man die entsprechende Distanz erzwingen, so muss man die Prozessabläufe durch **Entflechtung der Wegeüberlagerung** voneinander trennen. Dem entsprechend sollten die Wege der potentiellen Erregerträger, ob Mensch, Tier oder Ware, als **gerichtete Prozessketten** kollisionsfrei geplant werden. Als letzte greifende Möglichkeit im Bereich der baulichen Infektionsprävention kann man die Unterbrechung der Infektionskette durch vollständige **Separation** der Akteure erreichen. Diese physische bzw. mechanische **Barriereform** der Separation wird häufig in gesteigerter Form auch als **Isolation** beschrieben.

Die Separation und Isolation ist zur Steuerung der Prozessketten weit einfacher baufunktional-prozessual zu planen und auch bautechnisch-konstruktiv umzusetzen als die Distanzwahrung und Entflechtung der Wegeüberlagerung im freien Grundriss bzw. Layout. Die Herausforderung liegt hier in der ausreichenden Dimensionierung der infektionsrelevanten Bereiche auch unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten.

Bei der ineinandergreifenden Betrachtung der Ansatzmöglichkeiten der baulichen Infektionsprävention ist die kleinste Einheit somit die technische Komponente in Form

des Ausgangsmaterials bzw. Oberflächen und der Gebäudetechnik. Die Baukonstruktion fügt diese Einzelteile zu Bauteilen wie Wände, Decken, Böden oder Ausstattungsgegenständen zusammen. Die ablaufprozessoptimierte Planung verbindet diese Bauteilkomponenten wiederum zum großen Ganzen in Form des gebauten Raumes in Gebäudeentwurf bzw. Grundrisslayout. Diese integrale Herleitung der Planung stellt somit den Rahmen bzw. die Grenzen für eine bau- und prozessoptimierte Nutzung des Raumes zur Verfügung.

2.2.2 Planungsprozessoptimierung in der strategischen Phase

Die *ablaufprozessoptimierte Planung* beschäftigt sich mit dem Gegenstand des Entwurfes eines gebauten Raumes. Der dabei zugrundeliegende *Planungsprozess* mit seinen aufeinanderfolgenden Planungsphasen selbst kann ebenfalls kontinuierlich verbessert werden. In dem Forschungsprojekt *Praxis Krankenhausbau* wurde festgestellt, dass gerade die frühe Phase der Planung für den Erfolg eines gebauten Projektes verantwortlich ist (Holzhausen et al. 2016). In dieser frühen Planungsphase, meist auch strategische Phase genannt, ist die Einbindung von Experten unverzichtbar. Leider entspricht dies den heutigen Zusammensetzungen von Planungsteams nur bedingt.

Die Einbeziehung von Fachwissen in dieser entscheidenden Planungsphase, gerade in so spezifischen Themen wie der Infektionsprävention, kann hohe Folgekosten im Betrieb von Immobilien einsparen. Beispielhaft kann hier genannt werden, dass z. B. Hygienefachkräfte meist erst zum Zeitpunkt einer bereits abgeschlossenen Planung um Kommentare gebeten werden. Entsprechende Änderungswünsche können entweder gar nicht oder nur mit kostenintensiven und bautechnisch improvisierten Maßnahmen erreicht werden. Die Optimierung der Planungsprozesse in der frühen strategischen Phase gerade unter der **Einbindung von Hygieneexperten in Planungsbesprechungen** und der **Implementierung des Themas der baulichen Infektionsprävention in den frühen Planungsphasen** würde die bauliche Infektionsprävention weiter verbessern.

2.3 Etablierte Methoden des Bauens zur Infektionsreduzierung

Es können zwei Ansätze bei dem Umgang mit Infektionen im Bereich des Bauens ausgemacht werden, die bereits ihren Einzug in die Praxis mit verschiedenen methodischen Ansätzen gefunden haben. Der erste Ansatz versucht, die Infektionskette zu unterbrechen, in dem der Erreger eliminiert wird. Der zweite Ansatz versucht, die Infektionskette erst gar nicht zustande kommen zu lassen, in dem der mögliche Übertragungsweg eliminiert wird. In beiden Fällen wird einer der zwei Komponenten der Infektionskette, entweder Erreger oder Übertragungsweg, ausgeschlossen. Beide Ansätze werden wiederum über die zuvor beschriebenen bautechnisch-konstruktiven und baufunktional-prozessualen Komponenten realisiert.

2.3.1 Bautechnisch-konstruktive Methoden

Die bautechnisch-konstruktiven Methoden zielen darauf ab, die indirekte Infektionsübertragung zu unterbrechen. Dabei soll der Erreger im Bereich der Gebäudetechnik nach Möglichkeit erst gar nicht in die Ver- und Entsorgungsanlagen geraten oder dort aktiv herausgefiltert bzw. inaktiviert werden. Im Bereich der technischen Oberflächen wird je nach situationsbedingter hygienespezifischer Anforderung ein abgestimmtes Material eingesetzt.

2.3.1.1 Material und Oberflächen

Gerade in infektionsanfälligen Gebäuden wie z. B. dem Krankenhaus wurde erkannt, dass in hygienerelevanten Bereichen an die Oberflächenqualität des Raumes und der Ausstattungsgegenstände besondere Anforderungen gestellt sind. Dabei geht es nicht darum, alle Oberflächen auf dem gleichen Hygienestandard zu halten, sondern auch über die Prozessanalyse nur die Bereiche entsprechend infektionsprophylaktisch durch bautechnisch-konstruktive Maßnahmen zu ertüchtigen, die relevant sind. Die für die Unterbrechung der Infektionskette relevanten Oberflächen werden gereinigt, desinfiziert oder dekontaminiert. Des Weiteren müssen sie ihrer alltäglichen Gebrauchstauglichkeit nachkommen. Bei der Wechselwirkung der **Reinigungs-, Desinfektions- oder Dekontaminationsverfahrens** und ihrer Wirkstoffe mit dem Oberflächenmaterial muss darauf geachtet werden, dass diese auch langfristig betrachtet keine Schädigung der Oberfläche verursachen. Aus diesem Grund gibt es für verschiedene Bereiche wie z. B. für Krankenhäuser aber auch die Luftfahrtindustrie spezielle Abstimmungsverfahren und Zulassungen für Mittel zur Oberflächenbehandlung. Beispielshaft kann hier dargestellt werden, dass viele Kunststoffe durch die falsche Wahl des Pflegeprodukts spröde bzw. rissig werden.

Die Anforderungen an die Materialien müssen je nach Einsatzort infektionsrelevante Kriterien erfüllen. Viele der Anforderungen beziehen sich darauf, dass die strukturelle Integrität des Materials beibehalten wird, um den Erregern keinen Angriffspunkt des

Eindringens zu ermöglichen. So kann man bei den **mechanischen Anforderungen** nach *Schlagfestigkeit, Kratzfestigkeit, Scheuerbeständigkeit, Fugendichtigkeit, Rutschfestigkeit* oder nach dem *Verschleißwiderstand* differenzieren. Mögliche Kriterien der **chemischen und physikalischen Anforderungen** sind demnach *Säure-/Laugenbeständigkeit, Lösemittelbeständigkeit, Öl-/Fettbeständigkeit, Korrosionsbeständigkeit, Wasserdampfbeständigkeit, Flüssigkeitsdichtigkeit, reflexionsfreie Oberfläche* oder ihre *Ableitfähigkeit*. **Hygienische Anforderungen** können definiert werden nach Kriterien wie *leichte Reinigbarkeit, geringe Besiedlungsneigung durch Mikroorganismen, Desinfektionsmittelbeständigkeit* sowie *Dekontaminationsverfahrenbeständigkeit*. In der Planungsempfehlung für Gesundheitsbauten (Sunder et al. 2018) wurde für die unterschiedlichen Funktionsbereiche eines Krankenhauses wie z. B. den Operationsbereich eine entsprechende Kriterienliste mit dazugehörigen Materialempfehlungen aufgestellt.

In vielen hygienesensiblen Bereichen hat sich Edelstahl aufgrund seiner guten Eigenschaften in Hinblick auf die zuvor genannten Kriterien durchgesetzt. Die Materialwissenschaften versuchen neue Materialien mit den gleichen oder erweiterten Eigenschaften zu entwickeln. Als erweiterte Eigenschaften sind dies in der baulichen Infektionsprävention die **reduzierte Besiedlungsmöglichkeit** von Mikroorganismen aufgrund der Materialoberflächenbeschaffenheit wie z. B. ihre Rauheit oder die **keimreduzierende Wirkung** von Materialien aufgrund ihrer physikalischen Eigenschaften wie durch z. B. der Freisetzung von Ionen. Hierbei wird die Langzeitwirkung der Keimreduktion von z. B. Kupfer in Fachkreisen kontrovers diskutiert.

Beide Wirkweisen werden in jüngster Zeit gerade in Bezug auf Beschichtungsverfahren weiterentwickelt. Dabei werden **antibakterielle Beschichtungen** für textile und polymere (chemischer Stoff aus Makromolekülen) Oberflächen durch vakuumbasierte Beschichtungsprozesse (PVD-Prozesse; engl.: physical vapor deposition) erzeugt. Bei diesen Verfahren wird beispielsweise die antibakterielle Wirkung von Silber und Kupfer eingesetzt. Darüber hinaus wirken energetische und **oberflächenmorphologische Charakteristika der Beschichtung** einer **bakteriellen Adhäsion** (Haftwirkung) entgegen. Dadurch wird versucht, dass sich Keime erst gar nicht an der Oberfläche anlagern können (Fraunhofer FEP 2017).

Viele Anforderungen an das Material haben Einzug in Gesetze, Normen, Richtlinien und Empfehlungen gehalten. In Deutschland regelt seit 2001 das **deutsche Infektionsschutzgesetz** (IfSG 2000) die Prävention und Bekämpfung von Infektionskrankheiten beim Menschen. In diesem Gesetz sind die vorbeugenden Maßnahmen zur Übertragung von Krankheiten auf den Menschen, die schnelle Erfassung von Infektionen und die Vermeidung weiterer Verbreitung geregelt.

Das Infektionsschutzgesetz regelt dabei auch, dass z. B. beim Robert Koch-Institut (RKI) die Kommission für Krankenhaushygiene und Infektionsprävention (KRINKO) eingerichtet ist. Diese Kommission veröffentlicht fortlaufend Empfehlungen zu hygiene-relevanten Themen wie Reinigung und Desinfektion von Oberflächen, den Umgang

mit Patienten mit multiresistenten Erregern oder der Betriebsorganisation von Funktionsbereichen. Für den Bereich Oberflächen und Materialien hat die KRINKO die Empfehlung „*Anforderungen an die Hygiene bei der Reinigung und Desinfektion von Flächen*“ herausgegeben (KRINKO 2004). Dies ist nur eine von sehr zahlreichen Vorgaben im Bereich der baulichen Infektionsprävention.

Kritik und Potential

Hauptkritikpunkt bei dem Einsatz hygieneabgestimmter Materialien und der Weiterentwicklung der Oberflächen bleibt der sehr **autarke Fokus auf die Oberflächenqualität** des einzelnen Materials. In vielen Untersuchungen konnte jedoch ausgemacht werden, dass gerade die konstruktive Fügung an das Träger- oder Nachbarmaterial die eigentliche Schwachstelle der bautechnisch-konstruktiven Komponenten darstellt. Ein **konstruktiver Ansatz im Verbund** fehlt noch immer, sowohl bei der Materialentwicklung als auch in der gewerkeübergreifenden Planung.

Die **unübersichtliche Vorschriftenlage** macht es dem Planer unnötig schwer, die hygienisch abgestimmte Materialwahl zu treffen.

Die **unterschiedlichen standardisierten hygienespezifischen** Testverfahren für Materialien erschweren die Vergleichbarkeit von geeigneten Materialien zum Einsatz für die Infektionsprävention.

Allein das **Wissen über die antibakterielle Wirkung** der Oberflächen neuer Materialien führt in der Praxis zu **weniger Reinigungsanreiz** des Personals. Aus diesem Grund wird teilweise auf das Hinweisen des Einsatzes dieser Materialien verzichtet.

Hauptreinigungsverfahren ist immer noch die klassische Wischdesinfektion und damit auch die entsprechenden Vorgaben bei der Materialentwicklung. Neu Desinfektions- oder Dekontaminationsverfahren wie z. B. die **H₂O₂-Begasung oder UV-Bestrahlung**, diese werden im nächsten Kapitel beschrieben, werden noch unzureichend berücksichtigt und müssen stärker als Teil der baulichen Infektionsprävention **in Abstimmung mit der Materialforschung** weiterentwickelt werden.

2.3.1.2 Gebäudetechnik-Komponenten

Eine weit verbreitete Methode, Erreger mittels Gebäudetechnik-Komponenten an der Infektionsübertragung zu hindern, ist es, die Bakterien bzw. Keime aus der **Luft** bzw. dem Wasser herauszufiltern. Im Bereich der Luftfiltration wurden zu diesem Zweck sogenannte **Schwebstofffilter** entwickelt. Diese filtern Schwebstoffe mit einer Partikelgröße bzw. aerodynamischen Durchmesser kleiner 1µm heraus (VDI 2004). Je nach Wirksamkeit werden diese Filter unterteilt in Hochleistungspartikelfilter (EPA = *engl.* Efficient Particulate Air Filter), Schwebstofffilter (HEPA = *engl.* High Efficiency Particulate Filter) sowie Hochleistungsschwebstofffilter (ULPA = *engl.* Ultra Low Penetration Air Filter). In Deutschland ist statt Schwebstofffilter der Begriff **HEPA-Filter** gebräuchlicher. Mit diesen Filtern kann man Pollen, Stäube, Milben, Aerosole, Rauchpartikel und

für die Infektionsprävention am zweckmäßigsten Bakterien und Viren aus der Luft herausfiltern. Die häufigste Verwendung finden die HEPA-Filter im medizinischen Bereich, wie im Krankenhaus in Operationssälen und auf der Intensivstation, aber auch in Laboren sowie in der Kerntechnik oder in Reinräumen. Die Filter werden je nach Anwendungsbereich und Einsatzzweck in Filterklassen unterteilt. Die Wirkungsweise dieser Filter kann man auf drei Arten bzw. Effekte zurückführen. Aufgrund des *Trägheitseffekts* folgen größere Partikel nicht dem Luftstrom, sondern prallen gegen die Filterfasern und bleiben kleben. Kleinere Partikel, die dem Luftstrom um die Filterfasern herum folgen, bleiben aufgrund des sogenannten *Sperreffekts* (engl. Interception) haften, wenn sie der Faser zu dicht kommen. Beim *Diffusionseffekt* haben sehr kleine Partikel Zusammenstöße mit den Luftmolekülen und werden so in Richtung Filterfaser abgelenkt, wo sie wiederum haften bleiben.

Im Bereich der Filtration von **Wasser** gibt es die sogenannten **Umkehrosmosefilter** zur Wasserentkeimung. Diese Filtersysteme arbeiten mit einer semipermeablen Membran. Durch diese wird das zu filtrierende Wasser mit hohem Druck gepresst. Die Poren der Membran lassen die kleinen Wassermoleküle hindurch, halten aber die größeren Teilchen wie Nitrate, Pestizide, Schwermetalle, Mineralstoffe und wiederum für die Infektionsprävention wichtigen Bestandteile wie Bakterien und Keime zurück (Melin und Rautenbach 2007). Dieses hochreine Wasser ist für Labore oder die Raumfahrt sinnvoll. Ihre hohen Herstellungskosten und ihre nachträgliche Wiederauffüllung von vorher entzogenen Mineralstoffen zum gesundheitlich unbedenklichen Verzehr stehen einer Massentauglichkeit noch entgegen. Eine weitere Filtertechnologie stellen die **Mikrofilter** dar (Deerberg 2013). Diese besitzen mikroporöse Hohlfasermembranen mit Porengrößen von 0,2 µm und können daher Bakterien aus dem Wasser filtern. Diese Mikrofilter können beispielhaft direkt am Wasserhahn angeschlossen werden. Zunächst für mobile Lösungen wie z. B. Camping gedacht, finden diese Filter Anwendung im Krankenhaus oder mittlerweile auch in Entwicklungsländern zur hygienischen Wasserversorgung. Bei den meisten Mikrofiltern ist ein Wasserdruck von 2 bar erforderlich. Auch **Aktivkohlefilter** finden in der Wasserfiltration Anwendung. Da aber Aktivkohle einen sehr guten Nährboden für Mikroorganismen bietet, enthalten die Filter häufig keimreduzierendes Silber. Ihre Gebrauchstauglichkeit wird daher kritisch diskutiert.

Neben der Filtration können Infektionswege über die Medien Luft und Wasser durch weitere chemische und physikalische Verfahren reduziert werden. Eine weitere Möglichkeit der Entkeimung stellt die Verwendung von **Wasserstoffperoxid (H₂O₂)** dar. Wasserstoffperoxid ist eine weitgehend stabile Flüssigverbindung aus Wasserstoff und Sauerstoff. Die Verbindung ist mit Wasser in jedem Verhältnis mischbar. In der Wasseraufbereitung wird häufig die Anwendung von Wasserstoffperoxid zusätzlich mit UV-Strahlung verstärkt bzw. kombiniert. Wirken UV-Strahlen auf das Wasserstoffperoxid ein, entsteht mit dem Hydroxyl-Radikal ein wesentlich stärkeres Oxidationsmittel als das Wasserstoffperoxid selbst (Pettinger et al. 1991). In der Wasseraufbereitung

wird diese starke Oxidationswirkung zum Abbau organischer Verunreinigungen, zu denen Mikroorganismen wie Bakterien und Viren zählen, verwendet. Vorteil dieser **nassen Verbrennung** ist, dass nur Abbauprodukte wie Sauerstoff, Wasser, Kohlenstoffdioxid und Stickstoff zurückbleiben.

Bei der Raumdekontamination kommt das Wasserstoffperoxid gasförmig zum Einsatz (Reichenbacher et al. 2010). Man spricht hier auch von der **H₂O₂-Begasung**. In einem speziellen Apparat wird eine üblicherweise 25-prozentige Lösung verdampft und in den zu dekontaminierenden Raum bzw. Kammer geleitet. Die gute technische Realisierbarkeit, die Umweltverträglichkeit und die hohe keimabtötende Wirkung spricht für dieses Verfahren.

Ein abgewandeltes Verfahren zur Raumdesinfektion stellt die **Kaltvernebelung** dar. Das Wasserstoffperoxid wird dabei mit Silberionen in ein Aerosol, einem heterogenen Gemisch aus Schwebeteilchen, überführt. Dieses wird mit einem Aerosolerzeuger über einen festen Zeitraum je nach Konzentration (ab 3 %) im Raum verteilt. Dabei haben die Aerosole eine Tröpfchengröße von 2-10 µm. Der so erzeugte gleichmäßig im Raum verteilte Kaltnebel bewirkt eine Raum- bzw. **Luft- und Flächendesinfektion**. Je nach Einsatzgebiet muss die Apparatur zur Vernebelung und das abgestimmte Kaltvernebelungsverfahren im Vorfeld auf ihre Wirksamkeit validiert werden.

Wie auch bei der Wasseraufbereitung bzw. -Dekontamination kann auch bei der Raumluft und den Oberflächen die Ultraviolettstrahlung, kurz **UV-Strahlung**, zur Keimreduzierung eingesetzt werden. **Mikroben** werden unter UV-Strahlung bei ausreichender Dosis innerhalb von Sekundenbruchteilen **inaktiviert** (Hockberger 2002). Aufgrund dieser schnellen Reaktion werden UV-Strahler nicht nur bei der Desinfektion von Wasser oder Oberflächen, sondern auch bei der Desinfektion von Luft und auch in Klimakanälen geführten Luftströmen angewendet. Die UV-Strahlung wird in drei Bereiche A bis C mit unterschiedlichen Wellenlängen unterteilt. Bei der UV-Desinfektion an der Luft bzw. an den Oberflächen wird zumeist mit der Wellenlänge 254 nm gearbeitet, da diese Wellenlänge auch eine verbesserte Virusinaktivierung hervorruft. Im Wasser befindliche organische Stoffe werden mit kürzeren Wellenlängen kleiner 200 nm zerlegt. Damit befinden sich die Wellenlängen im Bereich der **UV-C-Strahlung**. Diese werden im Allgemeinen mit Niederdruck-Quecksilberdampflampen erzeugt.

In der Wasseraufbereitung wird als chemisches Verfahren die Reaktion und seine desinfizierende Wirkung von **Chlor** und Wasser zu Hypochlorit (Holleman et al. 2007) genutzt. Auf diese Weise wird neben Trinkwasser vor allem Schwimmbadwasser von Bakterien befreit. Bei der Reaktion können aber auch giftige oder krebserregende Stoffe wie z. B. Trihalogenmethane entstehen. Aus diesem Grund wird für die Desinfektion von Trinkwasser zunehmend Chlor durch Chloroxid und Ozon ersetzt.

Die zuvor beschriebenen chemischen und physikalischen Verfahren hatten zum Ziel, den Erreger entweder zu inaktivieren oder durch Filtration den Übertragungsweg an einem bestimmten Punkt der Infektionskette zu stoppen. Verschiedene Verfahren der

Lüftungstechnik versuchen hingegen den Aufenthaltsort oder besser noch das Fernhalten von Erregern durch Über- und Unterdruckstufen oder Luftströmungsverfahren zu kontrollieren. So wird die **Überdruckbelüftung** in den Bereichen, Räumen oder Zonen im Gebäude eingesetzt, in denen die Erreger vor dem Eindringen in diese Bereiche geschützt werden sollen, wie z. B. in Operationsräumen dessen einströmende Luft zuvor über HEPA-Filter gesäubert wurde.

Will man den potentiellen Erreger daran hindern, dass er einen bestimmten Bereich verlässt, so wird mit **Unterdrucklüftung** gearbeitet, wie z. B. in der Infektiologie beim Umgang mit isolierten hochkontagiösen Patienten (ABAS 2016). Dabei haben hintereinandergeschaltete Raumabfolgen gestaffelte Druckstufen.

Möchte man den Erregerweg kontrollieren, so wird versucht mit dem Aufbau von laminarer Strömung zu arbeiten. Als **laminare Strömung** wird dabei die Bewegung der Luft beschrieben, bei der keine Turbulenzen durch Querströmungen oder Verwirbelungen auftreten. Die Luft strömt dabei in Schichten, die sich nach Möglichkeit nicht miteinander vermischen. Dabei ist die turbulente Strömung das Gegenteil der laminaren Strömung. Im Bereich der Gebäudetechnik wird auch häufig die englische Bezeichnung **Laminar Air Flow** kurz **LAF** benutzt. Im Allgemeinen wird darunter eine meist vertikal von oben nach unten gerichtete **turbulenzarme Luftströmung** verstanden. Dabei wird Luft durch die Decke in den definierten Raum eingeblasen. Diese Luftströmung sollte möglichst turbulenzarm an allen Nutzern und Ausstattungsgegenständen nach unten strömen und verlässt dann im Sockelbereich durch Ausströmungsöffnungen den Raum. Auf diese Art sollen mögliche Aufwirbelungen von in der Luft befindlichen Partikeln wie z. B. Erreger reduziert und diese durch den zum Boden geführten Luftstrom abgeleitet werden.

Eingesetzt wird dieses Verfahren in Reinräumen der Halbleitertechnologie (Chip-Herstellung), in der Pharmazie und Medizin. So regelt z. B. die DIN 1946-4 z.Zt. noch in der Version von 2008 gültig, die Mindestanforderungen an raumluftechnische Anlagen (RLT-Anlagen) für Bauten des Gesundheitswesens. Sie dient zur Reduktion der mikrobiellen Kontamination durch entsprechende Lüftungsverfahren. Dabei wird in der Raumklasse Ia der OP-Räume eine **turbulenzarme Verdrängungsströmung** (TAV) für septische Operationsräume mit hohem Kontaminierungsrisiko vorgeschrieben. Bei der Raumklasse Ib reicht eine turbulente **Mischlüftung bzw. Mischströmung**.

Kritik und Potential

Die unterschiedlichsten Ansätze der physikalischen und chemischen Verfahren zur Erregerreduktion als integrierter Bestandteil der Gebäudetechnik zeigen die große Bandbreite der Möglichkeiten auf. Für den Architekten und Planer ist es aufgrund der Komplexität der Verfahren schwer, die richtige Auswahl der Komponenten zu treffen. Hinzu kommt, dass bei bestimmten Verfahrenstechniken Uneinigkeit über die Effektivität ihrer Wirkungsweisen besteht. Über den Einsatz dieser Verfahren wird daher kontrovers

diskutiert. Beispielhaft kann hier der Einsatz von laminaren Strömungen zur turbulenzarmen Verdrängungsströmung in Operationssälen genannt werden. Zwar gibt es medizinische Untersuchungen, die schlussfolgernd den Einsatz LAF-Anlagen befürworten (Kappstein 2001) und diese auch Einzug in die Normierung der RLT-Anlagen gefunden hat (DIN 1946-4). Es herrscht jedoch laut aktuellen Studien generell Uneinigkeit darüber, wie groß der Effekt von luftgetragenen Erregern am Ende tatsächlich ist. Die Kommission für Krankenhaushygiene und Infektionsprävention des Robert Koch-Institutes sieht keinen Vorteil in Bezug auf eine Infektionsprävention im Operationsgebiet durch eine RLT-Anlage mit turbulenzarmer Verdrängungsströmung (KRINKO 2010b). Dabei stützt sich die Kommission auf Studien, die keine Schutzwirkung des OP-Feldes aufgrund der Belüftung mit laminarer Luftströmung zeigt (Brandt et al. 2008; Breier et al. 2011; Scherrer et al. 2009).

Eine Studie geht dabei in ihrem Fazit so weit, dass es eine Verschwendung von Ressourcen wäre, neue Operationssäle mit LAF-Lüftungssystemen auszustatten (Gastmeier et al. 2012). Dieses eine Beispiel zeigt die Sensibilität des Spannungsfeldes von wirtschaftlichen Interessen und wissenschaftlicher Uneinigkeit von Experten in denen der Planer seine richtige Wahl der bautechnisch-konstruktiven Möglichkeiten der Infektionsprävention abwägen muss. Trotz der kontroversen Diskussion zur Effektivität von LAF-Systemen, sollten die Möglichkeiten des Einsatzes von **laminaren Strömungen** zur Kontrolle von Infektionsübertragungswegen weiterverfolgt werden. Potential wird hier gegenüber den hohen Turbulenzen über einem OP-Feld eher im Bereich der **Barrierenwirkung** durch einen kontrollierten **Luftschleier** gesehen. Dieser kann ähnlich einer Tür unterschiedliche reine bzw. unreine Bereiche voneinander trennen. Auch Strömungsgeschwindigkeit und Turbulenzen durch Verwirbelung bzw. Störung der Strömung können hier im quasi zweidimensionalen Bereich besser abgestimmt werden.

Weiteres Optimierungspotential wird im Bereich der Raumdesinfektion, d. h. der Luft- und Oberflächendesinfektion, gesehen. Bei der Oberflächendesinfektion ist immer noch die klassische Wischdesinfektion der Standard. Die **Vernebelungsverfahren mit Wasserstoffperoxid** könnten über die infektionssensiblen Bereiche wie z. B. einer Sonderisolation hinaus bis hin zur Basishygiene eines Patientenzimmers oder einer Flugzeugkabine neue standardisierte Desinfektionsverfahren, die in die Gebäude- bzw. Kabinentechnik integriert ist, hervorbringen.

Für eine Grundversorgung mit sauberem Wasser bzw. sauberer Luft als infektionspräventive Maßnahme in Entwicklungsländern, sollten technisch unanfällige Verfahren gewählt werden. Eine Weiterentwicklung der Filtrationsverfahren wie z. B. dem Einsatz von **Mikrofiltern** sollte daher weiterverfolgt werden.

Die altbekannte Technik des Einsatzes von UV-Strahlung zur Desinfektion erfährt in letzter Zeit eine Art Wiederbelebung. Dies ist darauf zurückzuführen, dass sich bei der UV-Desinfektion keine mutationsbedingten Resistenzen gegenüber Antibiotika entwickeln können, da es sich um ein physikalisches Verfahren handelt. Eine Zunahme von

Antibiotika-Resistenzen ist durch dieses Verfahren nicht möglich. Trotz allem muss man bei der **UV-Desinfektion** bedenken, dass es sich dabei um geometrisch betrachtet lineare Strahlung wie bei sichtbarem Licht handelt. Das heißt im Umkehrschluss auch, dass dort wo Licht auch Schatten ist und somit verbleibende Keime sind. Des Weiteren hat UV-Strahlung auch immer einen Einfluss auf den Oberflächenzustand des Materials wie z. B. dessen Sprödheitsgrad. Aus diesem Grund sind hier wie auch bei den chemischen Desinfektionsverfahren die Abstimmung mit dem entsprechend zu desinfizierenden Material zu berücksichtigen.

Als übergeordnetes Optimierungspotential wird bei den Gebäudetechnik-Komponenten die **konstruktive Integration** angesehen. Dass diese nicht nur als notwendiges Technik-Anhängsel, sondern als integraler Bestandteil des gebauten Raumes geplant wird. So könnten auch Hygienekomponenten wie z. B. ein Desinfektionsmittelspender auf Grundlage baufunktional-prozessualer Analysen selbstverständlich als Teil des Raumes geplant und benutzbar gemacht werden. Ebenso könnten technische Komponenten wie z. B. der Ablaufverfolgung, siehe Kapitel 3.4.3 *Ablaufverfolgung am Beispiel Warenkette*, integriert werden.

2.3.2 Baufunktional-prozessuale Methoden

Besonders für den Gesundheits- und Laborbau sowie für Bauten entlang der Nahrungsmittelproduktionskette bis hin zur Zubereitung in Küchen der Gastronomie oder Großküchen inkl. aller Ver- und Entsorgungswege haben sich bereits baufunktional-prozessuale Methoden zur Infektionsprävention etabliert. Diese Bauten zeichnen sich durch ihre hohen hygienesensiblen Anforderungen an den gebauten Raum aus. Des Weiteren können die eingesetzten Methoden sehr gut etabliert werden, da es sich um zum Teil zugangskontrollierbare Bereiche innerhalb der Gebäudestruktur handelt.

2.3.2.1 Entflechtung und gerichtete Wegeführung

Gerade im Bereich der Ver- und Entsorgungsprozesse von z. B. Luft, Wasser, Lebensmitteln, Medikamenten und medizinischem Sterilgut haben sich die **Entflechtung von Wegeüberlagerungen** etabliert. Bei der getrennten Wegeführung soll vermieden werden, dass sich *reine* Versorgungsprozesse an *unreinen* Entsorgungsprozessen kontaminieren. Die **gerichtete Wegeführung** ist dabei nach dem Einbahnstraßenprinzip aufgebaut. Dabei soll vermieden werden, dass potentiell infizierte Güter bzw. Erregerträger aus einem weit fortgeschrittenen Ablaufpunkt der Prozesskette wieder zu einem früheren Zeitpunkt in die Prozessroutine eingebracht werden können und damit erweitertes Infektionspotential besteht.

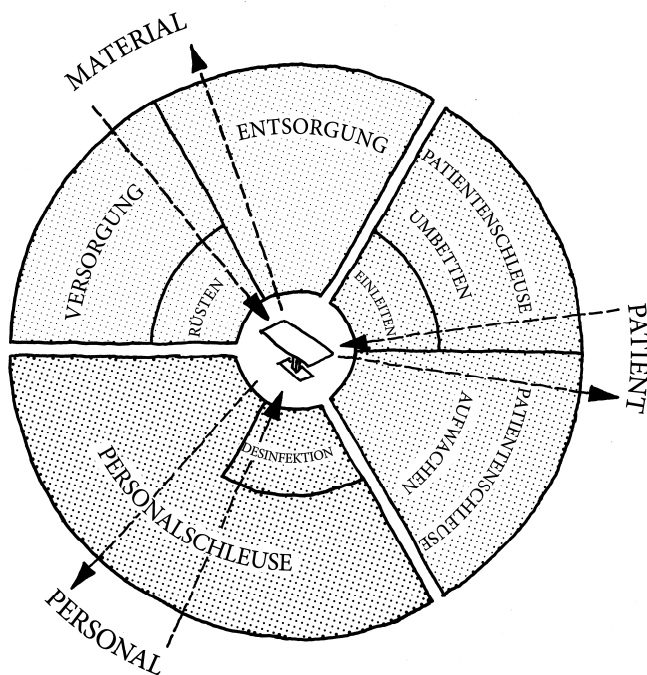


Abbildung 6: Entflechtete Wegeüberlagerung in Operationssälen (in Anlehnung an Sunder et al. 2018)

Beispielhaft kann hierbei die angestrebte Trennung von Prozessen in einem Operationssaal genannt werden (Sunder et al. 2018).

Hierbei ist vorgesehen, dass sich Überlagerungen der Bewegungsprofile des Sterilgutes bzw. Materials, des Personals sowie des Patienten auf ein Minimum reduzieren sollten. Nach Möglichkeit sollen alle drei Prozesse über eigene Zu- und Abwege verfügen, die in der Planung berücksichtigt werden müssen.

Ein weiteres Beispiel beschreibt der Ausschuss für staatlichen Hochbau der Bauministerkonferenz für gerichteten Ver- und Entsorgungsketten in seiner Empfehlung für die Planung und den Bau von Küchen und Kantinen (ARGEBAU 2002).

Die Abbildung zeigt, dass z. B. die Möglichkeit der Überlagerung der sauberen und unsauberen Transportwege zwischen der Geschirr-Reinigung und Ausgabe bzw. Garbereich besteht. An dieser Stelle kann eine mögliche Wegeüberlagerung bzw. -Kreuzung, die eine potentiell Infektionsrisiko beinhaltet, durch bauliche Komponenten vermieden werden.

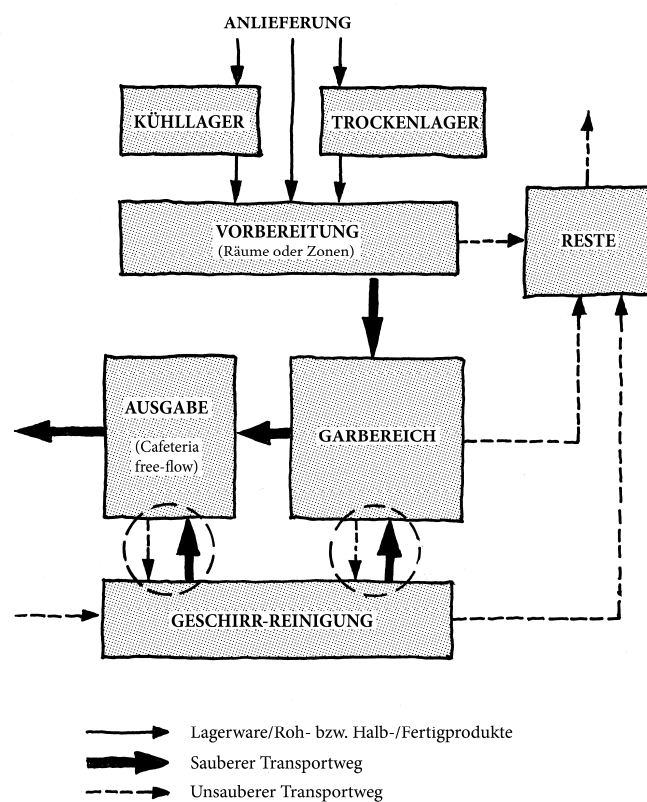


Abbildung 7: Materialfluss einer Küche mit gerichteten Ver- und Entsorgungsketten (in Anlehnung an ARGEBAU 2002)

2.3.2.2 Flächenzuweisung und Barrieren

Eine weitere Möglichkeit der zuvor genannten Entflechtung von Wegeüberlagerungen ist die direkte **Zuweisung von bestimmten Räumen oder Flächen aufgrund ihrer Hygienerelevanz**. Man spricht hierbei auch von sogenannten **Hygieneabstufungen**. Bei dem räumlichen Wechsel von einem Hygienestufenbereich zum nächsten findet eine bestimmte Tätigkeit statt. Meist ist dieser Grenzübergang besonders durch eine entsprechende Barriereform gekennzeichnet. Der Begriff der **Schwarz-Weiß-Trennung** kommt ursprünglich aus dem Bereich des Bergbaus und bezeichnet bereits dort die räumliche Trennung bzw. den Übergang vom verdreckten Schwarz-Bereich des Arbeitens zum Weiß-Bereich der Freizeitwelt. Diese Schwarz-Weiß-Trennung findet ihre Schnittstelle bzw. Grenzübergang in der Umkleidekabine. Dieses Prinzip wurde auf die Infektionsprävention übertragen, um die Verschleppung vom kontaminierten Bereich am Grenzübergang bzw. der Barriere in den sauberen, nicht kontaminierten Bereich zu verhindern.

Technische und bauliche sowie organisatorische Maßnahmen werden z. B. in Deutschland in „*Technischen Regeln für Biologische Arbeitsstoffe*“ der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin geregelt. Die dort herausgebrachte technische Regel „*Grundlegende Maßnahmen bei Tätigkeiten mit biologischen Arbeitsstoffen*“ (TRBA-500 2012) stellt die Grundlage für so verschiedene Arbeitsgebiete und damit auch Gebäude wie der Medizin, Labortechnik, Lebensmittelproduktion bis hin zur Tierhaltung dar. In der TRBA 500 wird bereits auf die räumliche Trennung von belasteten und unbelasteten Arbeitsbereichen (Schwarz-Weiß-Trennung), raumluftechnische Maßnahmen (Gebäudetechnik), geschlossene Förderwege (entflochtene gerichtete Wegeführung) etc. hingewiesen. Im speziellen weist z. B. das Gentechnikgesetz (GenTG), näher ausgeführt in der Gentechnik-Sicherheitsverordnung (GenTSV), für Laborbereiche, Gewächshäuser und Tierhaltungsräume abgestufte biologische Sicherheitsbereiche der Sicherheitsstufe 1 bis 4 (S1-S4) aus. Die baulichen Anforderungen an diese Bereiche sind je nach Sicherheitsstufe ausgewiesen.

Selbst im Bereich der Tierzucht wird auf die strikte Schwarz-Weiß-Trennung zur Infektionsunterbrechung inklusive baulicher Voraussetzungen wie z. B. in der Schweinehaltungshygieneverordnung (SchHaltHygV 2017) geachtet. Dieses Prinzip der Zuweisung von Räumen oder Flächen nach Schwarz oder Weiß wurde im Bereich der Medizin um einen weiteren Bereich erweitert. Dem Raum des Übergangs von potentiell kontaminiert zu sauber wird damit eine besondere Aufmerksamkeit zugewiesen. In Deutschland wird dieser Bereich als Grau-Bereich bezeichnet. International werden diese Schwarz-Grau-Weiß- oder auch Heiß-Warm-Kalt-Bereiche als **Grün-Gelb-Rot-Bereiche** bezeichnet. Dem Gelb-Bereich fallen je nach Konstellation eine besondere Barrierefunktion zu. Dieser kann baulich in einem Schleusenbereich oder Schleusenraum realisiert werden. In diesem Gelb-Bereich finden wiederum hygienerelevante Prozesse

statt. Hier können Waren dekontaminiert oder wiederum Kleidung bis hin zur Persönlichen-Schutz-Ausrüstung (PSA) gewechselt werden. So wird z. B. im Beschluss des Ausschusses für Biologische Arbeitsstoffe (ABAS 2016) für das Arbeiten in Sonderisolationen auf die strikte Trennung von Grün-Gelb-Rot-Bereichen hingewiesen und die Anforderungen zum Vorraum (Grün), Schleuse (Gelb) und Patientenbereich (Rot) beschrieben.

Auch in diesem Fall der Sonderisolation wird der Gelb-Bereich als **Schleuse** mit definierten räumlichen Abmessungen und gebauten Begrenzungen realisiert. So dient die Schleuse hierbei nicht nur zur **räumlichen Trennung** mittels der Barrierewirkung von Türen, sondern dient auch als **Dekontaminationsort** für Kleidung und Material. Darüber hinaus kann durch die bauliche Schleusensituation mit unterschiedlichen Luftdrücken eine **Druck-**

kaskade Richtung Patientenbereich realisiert werden (ABAS 2016). Gleiche Barrierekonzepte werden im Laborbereich wie z. B. in Tierlaboren realisiert. Genau wie beim Menschen muss auch hier bestimmt werden, ob der Patienten-

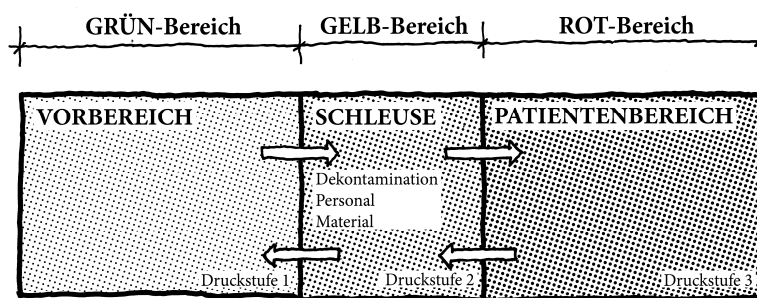


Abbildung 8: Zuweisung von Flächen nach Grün-Gelb-Rot-Bereichen

bzw. Tierbereich als Quarantänefläche (rot) oder als reiner Bereich (weiß) zum Schutz vor Infektionen bei z. B. immunsupprimierten Patienten definiert werden soll. Je nach Hygieneabstufungsrichtung kann dann mit Druckkaskaden und Personen- bzw. Materialschleusen gearbeitet werden. Im Bereich der Tierlabore werden in den Schleusen sogar sogenannte **Zwangsduschen** für das Personal im Schleusenbereich eingesetzt.

2.3.2.3 Separierung und Isolation

Die höchste Form der räumlichen Separierung zur Infektionsprävention ist die Isolierung des potentiellen Erregerträgers durch Unterbringung in kontrollierten Bereichen im Sinne einer **Quarantäne**. Auch in diesem Fall müssen wiederum die zwei Blickrichtungen differenziert werden. Soll die Umgebung vor der Weitergabe von Erregern aus einem bestimmten Gebäudebereich geschützt werden wie z. B. bei Sonderisolationen und Laborbereichen oder soll ein bestimmter Bereich vor dem Eindringen von Erregern geschützt werden wie z. B. bei onkologischen Stationen mit immungeschwächten Patienten. In Beiden Szenarien können entweder einzelne Zonen, Räume oder ganze Raumzusammenhänge als Rot-, Gelb- oder Grün-Bereiche definiert werden. Auf Intensivstationen werden entweder Einzelzimmer als **Isolierzimmer** mit vorgeschalteten

Schleusen oder vorher definierte Bereiche bzw. Zonen von mehreren Patientenzimmern mit gleicher Erkrankung zu sogenannten **Kohortenisolierung** (Gruppenisolierung) zusammengestellt.

Die Quarantäne stellt eine zeitlich befristete Isolation von Menschen oder Tieren als potentielle Erregerträger dar. Viele Länder sehen die Quarantäne beim Import von Tieren als präventive Maßnahme an. Die Dauer der Quarantäne entspricht der Inkubationszeit der vermuteten Krankheit. Die Quarantäne ist eine äußerst aufwendige infektionspräventive Maßnahme. Aufgrund ihrer hohen Wirksamkeit muss sie insbesondere bei hochansteckenden Krankheiten mit hoher Sterblichkeit angewendet werden.

Im **Pandemiefall** müssen an strategisch wichtigen Infrastrukturbauten wie z. B. dem international eingebundenen Flughafen spezielle Flächen für eine mögliche Quarantäne zur Verfügung gestellt werden. Da solche Flächen gegebenenfalls die Passagiere eines Großraumflugzeuges aufnehmen muss, werden diese nicht permanent für den Fall der Quarantäne freigehalten, sondern werden erst zu diesem Zweck aus zuvor mit anderen Funktionen betriebenen Flächen umgewandelt. So können z. B. Hangars oder Sporthallen, evtl. der Flughafenfeuerwehr, für die kurzfristige Umnutzung zu Quarantäneflächen ausgewiesen werden.

Für den Bereich der baulichen Infektionsprävention zeigt dies, dass nicht nur für den sogenannten **Normalbetrieb** Flächen in dafür vorgesehenen Einrichtungen zur Isolation von Erregern geplant werden, sondern auch in ganz anders gelagerten Gebäuden im infektionskritischen **Akutfall** z. B. einer Pandemie Flächen für eine notwendige Quarantäne durch schnelles Umwandeln von Funktionsbereichen zur Verfügung gestellt werden müssen.

Kritik und Potential

Die derzeit häufigsten baufunktional-prozessualen Methoden der Infektionsprävention werden in Bereichen durchgeführt, die personengruppenbezogen zugangsbeschränkt sind. Die Schwarz-Weiß- bzw. Rot-Gelb-Grün-Trennung unter Zuhilfenahme der Barrierewirkung von Schleusen bis hin zu Quarantänemaßnahmen sind räumlich kontrolliert. Dies gilt für besondere Bereiche im Gesundheitsbau, des Laborbaus, der Lebensmittelproduktion inklusive der Tierzucht sowie bei Großküchen.

Lebensmittel- sowie Warenketten und Tiere sind leichter zu kontrollieren, Menschen aufgrund ihrer individuellen Freiheit naturgemäß weniger. Optimierungspotential wird daher im Bereich der **öffentlichen Bauten** bei der Entflechtung von Wegeüberlagerungen und der gerichteten Wegeführung gesehen. Gerade das Infektionsrisiko der direkten Übertragung in öffentlichen Bereichen mit hohem wechselndem Personenaufkommen wie bei Bauten des Nah- und Fernverkehrs, des Lernens sowie des Versorgungs- und Freizeitkonsums könnte durch **neue baufunktional-prozessuale Barriereformen** reduziert werden. Dabei könnten beispielhaft bereits vorhandene Übergangsformen bzw. Schleusen von einem Bereich in den nächsten genutzt werden,

um an diesen Punkten auch infektionspräventive Maßnahmen zu etablieren. Wie z. B. bei Sicherheitskontrollen an Flughäfen, Zugangskontrollen bzw. Eingängen in Stadien, Museen, Nahverkehr etc.

Auf der anderen Seite müssen Planer das Wissen über das Bewegungsverhalten des Menschen im Raum nutzen, um mit ihrer Planung eine möglichst **kontaktlose distanzwahrende Raumnutzung** zu ermöglichen. Um das grundsätzliche Verständnis dieser Wechselwirkung von Raumnutzungsverhalten und Infektionspotential besser zu verstehen und ihre Beeinflussbarkeit über den gebauten Raum zu überprüfen, sind **interdisziplinäre Studiensettings** nötig. Diese müssen alle Wissenschaftsdisziplinen beinhalten, die das **Verständnis** von **Raum**, **Infektionsübertragung** und **Sozialverhalten** abdecken.

3. Exaptation der Erkenntnisse anderer Wissenschaftsdisziplinen

Die in Kapitel 1 beschriebenen Übertragungswege von Infektionskrankheiten im Zusammenspiel mit Komponenten des Bauens zeigen die hohe Komplexität in diesem Themenfeld. Im folgenden Kapitel wird die Arbeitsweise unterschiedlichster wissenschaftlicher Disziplinen untersucht, um mögliche ableitbare Methoden zur baulichen Infektionsprävention ausfindig und nutzbar zu machen. Dies sind Disziplinen wie die klassische Epidemiologie, die digitale Epidemiologie, medizinische Geografie, das Arbeiten mit agentenbasierten Modellen, der kulturellen Anthropologie, aber auch infektionsferne Themenfelder wie die Architekturpsychologie oder die Bewegungsmustererkennung von Menschen.

3.1 Expertenbefragung

3.1.1 Anlass

Eine vertiefende Literaturrecherche im Bereich der baulichen Infektionsprävention hat gezeigt, dass es kaum Studien mit einem ganzheitlichen Ansatz im Themenfeld Bau / Architektur hierzu gibt. Eine darüberhinausgehende Anfrage im April 2016 beim Bauinformations-Service des Fraunhofer-Informationszentrums Raum und Bau IRB in Stuttgart ergab, Zitat: „Zum Thema „Architekturwissenschaftliche Analyse, Bewertung und Lösung zur Kontrolle der Infektionsausbreitung“ liegen uns in unserer Literatur- und Bauforschungsdatenbank überhaupt keine Fachpublikationen vor.“

Um sich dem Themenfeld der baulichen Infektionsprävention mit einer anderen methodischen Arbeitsweise weiter zu nähern, wurden Experteninterviews der benachbarten wissenschaftlichen Disziplinen durchgeführt.

3.1.2 Methode

Es wurden Interviews im Zeitraum März bis September 2016 mit acht ausgewählten Experten im Bereich der Infektionsübertragung geführt. Diese Experten kommen aus den Bereichen Risikobewertung, biologische Sicherheit, lebensmitteltechnologische Verfahren, Warenketten, Zoonosen und Antibiotikaresistenzen, Surveillance, spezielle Pathogen, epidemiologische und statistische Methoden, theoretische Biologie, epidemiologische Modellierung von Infektionskrankheiten, etc. Eine detaillierte Liste zu den Experten und ihren wissenschaftlichen Einrichtungen finden Sie im Anhang dieser Arbeit. Jedes Interview wurde einzeln anhand eines vorher entwickelten standardisierten Fragebogens im persönlichen Vor-Ort-Gespräch durchgeführt und dauerte ca. 30-45

Minuten. Es wurde sich bewusst für eine qualitative Befragung mit ausgewählten Experten entschieden, um Raum für mögliche persönliche Stellungnahmen zu lassen, die bei einer quantitativen Befragung möglicherweise nicht erfasst worden wären.

3.1.3 Ziel

Ziel der Befragung war, ein Verständnis für die Arbeit der Experten-Gesprächspartner zu entwickeln und weitere mögliche wissenschaftliche Disziplinen für die Ableitung von etablierten Methoden für die bauliche Infektionsprävention ausfindig zu machen. Darüberhinausgehendes Ziel war es, eine Möglichkeit zur Entwicklung gemeinsamer Präventionsstrategien unter Einbeziehung baulicher Maßnahmen zu prüfen.

3.1.4 Ergebnis

Im Folgenden werden die standardisierten Fragen dargestellt. Die Antworten werden inhaltlich zusammengefasst in Themengruppen dargestellt, um Wiederholungen zu vermeiden. Dies beeinflusst die Auswertung nicht, da es sich um eine qualitative und nicht quantitative Auswertung handelt.

Was ist die Kernstrategie Ihrer Forschung bzw. Arbeit zur Unterbrechung von Infektionsketten?

Bauliche Aspekte

Für den Bereich der baulichen Aspekte ist hier die Separierung der Bereiche durch bauliche **Schwarz-Weiß-Trennung** wichtig, d. h. die entsprechenden Bereiche werden in potentiell kontaminiert und dekontaminiert unterschieden. Dies kann z. B. in der Planung von Großküchen geschehen. Darüber hinaus können im Ablaufprozess **verfahrenstechnische Barriereformen** der Hygiene etabliert werden, wie z. B. bei der Lebensmittelproduktion von Hühnern durch Erhitzung bzw. Brühen oder Rupfen. Dem gegenüber sollten **physische Barriereformen** wie **Schleusen** implementiert werden. Um keine Wege- bzw. Prozessüberschneidungen zu erhalten, sollten **gerichtete Warenströme** (Einbahnstraße) ermöglicht werden. Dies bezieht sich auf Küchen, Nahrungsmittelproduktion, Tierhaltung, Logistik etc. Dabei muss auf eine **klare und entflochtene Wege- und Funktionsführung** geachtet werden. Ebenso muss **ausreichend Bewegungsfläche** eingeplant werden, um ausreichend Abstandsfläche zwischen potentiellen Infektionskontakten zu haben.

Überwachung

Im Bereich der Surveillance bzw. Überwachung von Infektionskrankheiten hat das **frühzeitige Erkennen der Ausbrüche** und die **Vermeidung von weiteren Ausbrüchen** oberste Priorität. Das Monitoring bzw. die Beobachtung der Kontaktpersonen je nach Erkrankung und die Erkennung von Kreuzungspunkten sind hierbei ebenfalls von hohem Interesse. Das sogenannte **Traceback**, d. h. die nachvollziehbare **Rückfindung des Erregerweges** bis zur Ursprungsquelle sind weitere wichtige Themen von Forschungsaktivitäten in der Infektionsprävention. Hierzu gehört auch die Untersuchung des sogenannten **Zooglow**, bei dem die internationalen **Warenströme** analysiert werden.

Mathematische Modellierung

Mit Hilfe von mathematischen Modellierungen können **idealisierte Systeme von Infektionsausbreitungsmustern** aufgebaut werden. Diese können nach Effektivität modelliert werden und sind dann nicht intuitiv. Oder sie können intuitiv nach Populationen aufgebaut werden, wenn sogenannte Superspreader (Superverbreiter von Infektionen, wie z. B. in bestimmten Szenarien ggf. Ärzte) herausgerechnet werden. Ebenso können **Metapopulationsmodelle**, wie sie bereits in der Ökologie etabliert sind, weiter im Bereich der digitalen Epidemiologie adaptiert und ausgebaut werden.

Ganzheitliche Strategie zum Umgang mit Infektionen

Infektionen müssen erkannt und beherrschbar werden, hierzu muss eine ganzheitliche Strategie weiterentwickelt werden. Diese Strategie beginnt mit der **Früherkennung**. Dazu müssen geeignete Frühwarnsysteme etabliert werden. Im nächsten Schritt muss die **Prävention** greifen. So darf es z. B. im Bioterrorismus gar nicht erst zu einer Freisetzung von Erregern kommt. Man spricht hierbei von Bio-Security bzw. Bio-Safty. Weiteres Standbein dieser Strategie ist die entsprechende **Vorbeugung bzw. Vorbereitung** für einen entsprechenden Krisenfall. Krisenplanung und eine entsprechende **Sensibilisierung** müssen immer wieder überarbeitet werden. Auch die **Reaktion** auf den Krisenfall muss trainiert werden. Beispielhaft kann hier das Anlegen von Schutzkleidung genannt werden. Im Anschluss muss die **Wiederherstellung** des Zustandes vor dem Erregerereignis erfolgen. Meist geschieht dies durch Dekontamination, unabhängig ob es sich um einen OP-Raum handelt oder eine andere gebaute Umwelt betrifft.

Anmerkungen der Befragten

Es wird darauf hingewiesen, dass die unterschiedlichen Strategien nur dann wirklich greifen können, wenn die entsprechenden Entscheider in den unterschiedlichsten Zusammenhängen vom Bauplaner bis zum Pandemie-Krisenmanager, sei es im Krisenfall oder bei der alltäglichen Arbeit, die Erkenntnisse der aktuellen Forschungsansätze,

seien es Modellierungen oder Klassifizierungen, respektieren bzw. sich diese zunutze machen. Ebenso ist dabei zu bedenken, dass die Risikoperzeption international sehr unterschiedlich ist und dabei die subjektive Wahrnehmung zu präventiven Maßnahmen divergiert.

*

Welche Gebäudetypen würden Sie in die Betrachtung mit einbeziehen?

Typologie

Typologisch betrachtet sind dies die **Gebäude des öffentlichen Gesundheitswesens** wie Kliniken, Praxen aber auch Altenheime. **Gebäude des öffentlichen Verkehrs** wie Flughäfen und Bahnhöfe sowie **Bildungseinrichtungen** wie Kitas, Schulen und Universitäten sind strategisch mit in die Infektionsprävention mit einzubeziehen. Grundsätzlich kann man aber auch private Bereiche wie das Einfamilienhaus oder die Wohnung betrachten, gestaffelt nach Höhe der Wahrscheinlichkeit.

Im Detail

Die besondere Situation der **Gemeinschaftsverpflegung mit Großküchen** stellt einen besonderen verbindenden Faktor über Menschengruppen hinweg in der Infektionskette dar. Ebenso ist die Situation in **geschlossenen Räumen** über einen längeren Zeitraum hinweg noch nicht erschöpfend erforscht, wie z. B. in Fernbussen, Zügen, Flugzeugen und Kreuzfahrtschiffen. Bezogen auf den klassischen Bau trifft dies auf Konferenzräume zu.

Anmerkungen der Befragten

Bei der Betrachtung der Infektionsübertragung ist nicht der Gebäudetypus der **entscheidende Faktor**, sondern die **Dichte, Anzahl und Zusammensetzung der Nutzer**. Ebenso ist entscheidend, welche Art von Erregerübertragung dort stattfindet. Im Besonderen bei Gebäuden des öffentlichen Raumes besteht die Gefahr durch die Weitergabe bestimmter Erreger aufgrund der hohen Nutzerdurchmischung. Sollte es zu einer Priorisierung kommen, sollten lieber die **hochinfektiösen und lebensbedrohlichen Erreger** durch z. B. Luftübertragung genauer betrachtet werden. Auch hier wiederum ist die Betrachtung in geschlossenen Räumen über einen längeren Zeitraum sinnvoll.

*

Betrachtung nur unter Gesichtspunkt Mensch oder auch Tier und Güter, Wasser und Luft?

Menschen

Die Menschen sollten im Besonderen betrachtet werden, da ihre **individuellen Bewegungen** am schwersten im Vergleich zu Tieren in Tierzucht oder dem Warenverkehr zu kontrollieren sind. In der Betrachtung der baulichen Hygiene ist der **Mensch-zu-Mensch-Kontakt** der wichtigste, erst an zweiter Stelle kommen Komponenten wie Wasser und Luft.

Tier

Bei der Betrachtung von Tieren werden die Tier-Mensch-Übertragungen, also die **Zoonosen** immer häufiger. In diesem Zusammenhang werden die **lebendübertragenden Erreger** immer wichtiger.

Systemisch

Bei der Betrachtung von Luft, Wasser und Lebensmittel muss über die **Ausbreitungsintensität** nachgedacht werden. Die Systeme müssen stärker nach der **Effizienz der Erregerausbreitung** betrachtet werden. Dabei geraten Szenarien in den Fokus, bei denen eine Infektionsquelle sehr viele Menschen erreichen kann. Des Weiteren ist in der systemischen Betrachtung die **Überlebensdauer der Erreger** auf Oberflächen relevant, da die Übertragung bestimmter Erreger nicht nur von Mensch-zu-Mensch, sondern auch von Oberfläche-zu-Mensch erfolgen kann.

*

Welche benachbarten Disziplinen würden Sie für abzuleitende Präventionsstrategien analysieren?

Wissenschaften

Zum besseren Verständnis des Verhaltens des Menschen im Raum bietet sich die **Anthropologie** an. Hierbei kann untersucht werden, wie Schwellen unterschiedlich überschritten werden. Im Bereich der Ingenieurwissenschaften sind die **Materialwissenschaften** zu Oberflächen, sowie **sichere Wasserversorgung** und **Qualitätssicherung der Hygiene** wichtige Disziplinen im Bereich der Infektionsprävention. Aus dem Bereich der **Gesundheitsgeografie** sind die Kenntnisse der **GIS – Geo-Informationssysteme** mit ihrer räumlichen Analyse der Prozesse wertvolle Hilfe. Im Bereich der Naturwissenschaften können die „**Zustandsänderungen in dynamischen Systemen**“, die in der **Physik** beschrieben werden, weitere Aufschlüsse für das Verständnis von Erre-

gerausbreitungen geben. Auch die Wissenschaftsbereiche **Computational Social Science** sowie **Next Generation Sequenzing** können einen neuen Ausblick für das Verständnis von Infektionsausbreitungsgeschehen vermitteln.

Modellierung- Simulationsebene

Im Bereich der **Modellierung bzw. Simulation** können **Gebäude-Kontaktnetzwerke** erstellt werden und damit Infektionsketten sichtbar gemacht werden. In gleicher Weise können über das **Mensch-Tracking**, also die Nachverfolgung von Bewegungsmustern der Menschen, Kontaktmuster erstellt werden. Die **Untersuchungen zur Unterstützung von Menschenlenkung** können weiter Hilfe zur Infektionsprävention geben. In diesen Untersuchungen werden verschiedene Szenarien zu Menschenansammlungen und ihr Verhalten im Raum bei bestimmten räumlichen Parametern beobachtet. Diese Parameter können z. B. ein Strich auf dem Boden zur Menschenlenkung, sowie Spiegel an Wänden oder Säulen an Ausgängen, bei denen sich besser vor dem Eingang eingefädelt wird, darstellen.

Anmerkung zur Auswertung

Die unterschiedlichen wissenschaftlichen Disziplinen waren sich nicht immer einig in der Auswertbarkeit bestimmter Methoden. Hierbei wurde darauf hingewiesen, dass das **Modellieren** von Luft, Reiseströmen, Umweltstabilität zur Verständniserweiterung gut, aber auch die **Betrachtung des Einzelfalles** zur konkreten Ableitung von Verbesserung mit einbezogen werden muss.

*

Wie stellen Sie Ausbreitungs-Szenarien bzw. Bewegungsmuster von Infektionsträgern dar?

Visualisierung Erregerausbreitung

Dies kann durch **Netzwerkdiagramme**, wie z. B. bei Weiser (Weiser et al. 2013) erfolgen. Des Weiteren können **interaktive Netzwerkanalysen** wie bei Brockmann (Brockmann 2014) durchgeführt werden.

Bestehende Modelle

Als bestehende Modelle werden hierbei das FoodChain-Lab (BfR 2017b), das FoodProcess-Lab (BfR 2017c) und das PMM-Lab (BfR 2017e) des Bundesinstitut für Risikobewertung (BfR) genannt. Hierbei werden **Warenströme** modelliert. Ebenso wird die **Simulation** der weltweiten Ausbreitung eines Ebola-Erregers per Flugzeug am Robert-Koch Institut (RKI) (Brockmann et al. 2014) genannt.

Aufbau mathematische Modelle

Die mathematischen Modelle werden zumeist als sogenannte **Agenten-Basierte-Modelle** aufgebaut. Sie sind wie **Populationsmodelle** geschaffen, sind evidenzbasiert, prädikativ und nicht statisch. Je nach Modell werden unterschiedliche Programmiersprachen verwendet. Genannt werden hierbei R, C, Phyton. Hinzu kommen entsprechende Software-Applikationen.

Ausblick im Krankenhaus

Mit Hilfe von Geo-Informationen-Systemen können Prozesse auf der Station erfasst werden. Entsprechende Systeme wurden bereits von einer finnischen Firma entwickelt hat. In Deutschland ist die Anwendung solcher Systeme aus datenschutzrechtlichen Gründen problematisch. Auf der anderen Seite könnten vorhandene Daten, die schon im Krankenhausmanagementsystem erfasst sind, an der Datenschnittstelle HNL7 des Krankenhauses abgegriffen werden und einen Überblick über die Station bringen. Die Daten müssten nur neu interpretiert werden.

*

Welche infektionspräventiven Anforderungskriterien würden Sie an das Gebäude stellen?*Systemisch*

Hierbei müssen **zielorientierte Lösungsansätze** für die entsprechenden Gebäudetypologien entwickelt werden. Eine Isolierstation sollte hierbei anders behandelt werden als ein Laborgebäude, dies wiederum anders als ein Eigenheim usw. Ebenso muss auf die **Verhältnismäßigkeit** der baulichen Maßnahme geachtet werden.

Konkret

Als konkrete praxisnahe Anforderungen werden hierbei genannt, dass die **Flächen, Abstände, Raumgrößen richtig dimensioniert** werden müssen. Ebenso sollte die **Wegführung optimiert** werden. Des Weiteren muss die **technische Gebäudeausrüstung**, wie z. B. die Luftzirkulation oder das Vorhandensein einfacher Waschmöglichkeiten, entsprechend definiert werden.

*

Haben Sie konkrete Vorschläge zur Unterbrechung von Infektionsketten in Gebäudesystemen?

Planungsprozess

Wenn man Infektionsketten unterbrechen möchte, muss man kontinuierlich weiter forschen, um alle Facetten der **Funktionsweise der Infektionsausbreitung** zu **verstehen**. Im Planungsprozess muss vor dem Beginn der eigentlichen Bauplanung eine **Defizitanalyse des Gebäudesystems** in Bezug auf Erregerausbreitungschancen durchgeführt werden. **Checklisten** mit Maßnahmen zur baulichen Infektionsprävention müssen etabliert werden. Umgesetzte Interventionen müssen auf ihre Wirksamkeit **validiert** werden. Die Anwendbarkeit der Maßnahme muss geprüft werden, wie z. B. die Desinfektionsmittelbeständigkeit bestimmter verbauter Materialien.

Umsetzung im Bau

Konkrete Umsetzungen im Bau können die Unterstützung bzw. **Implementierung** von **chemischen Barrieren** wie z. B. die Händedesinfektion mithilfe der sichtbaren und leichterreichbaren Montage von entsprechenden Spendern sein. Genauso können **mechanische Barrieren**, wie z. B. Handschuhe, Mundschutz und Schleusen, durch den Bau unterstützt bzw. in diesen implementiert werden. **Technische Anlagen zur Infektions-Kontakt-Verfolgung** (Contact-Tracing) können in Gebäudekomponenten verbaut werden. **Gerichtete Schleusen** (Einbahnstraßen) können Personen- und Warenströme infektions-konfliktfrei lenken. Ebenso können Infektionsketten durch **Separierung** wie abgetrennte Bereiche und Zugangsberechtigungen unterbrochen werden. **Neue Materialien** können die Kontaktübertragung evtl. reduzieren. Eine räumliche Trennung von rein und unrein kann Infektionen mindern. **Abtrennungen und Isolierungen** sollten variabel gestaltet werden.

Bestehende Planungstools

Im Bundesinstitut für Risikobewertung (BfR) wurden bereits Planungstools entwickelt. Diese nennen sich **Bio-Security-Planer** und **Food-Security-Planer** und sind auf der Homepage des BfR einsehbar.

3.1.5 Übertrag

Auf Grundlage der Ergebnisse der qualitativen Befragung werden nun in folgenden Kapiteln entsprechende herausgearbeitete Themengebiete im Zusammenspiel von Infektionsausbreitung und mögliche baulichen Präventionsmaßnahmen genauer betrachtet.

3.2 Zusammenspiel Raum, Mensch und Gesundheit

Bei der Analyse inwieweit der gebaute Raum, also die Architektur, im Zusammenspiel mit Infektionen in Zusammenhang stehen, muss zunächst der gebaute Raum als Teil der Umwelt definiert werden. Unsere Umwelt beeinflusst das Wohlbefinden, die Gesundheit und Lebensqualität in vielfältiger Weise (Claßen 2017). In der ganzheitlichen gesundheitswissenschaftlichen und humanökologischen Betrachtung wird hierbei die Umwelt in vier Bereiche unterschieden. Die natürliche, die soziale, die kulturelle und schlussendlich die baulich-technische Umwelt (Kruse-Graumann 1974). Letztgenannte steht hierbei synonym für die besiedelte und städtische Lebensumwelt. Diese Definition geht in der Betrachtung vom Städtebau, über die Architektur bis hin zum gebauten Raum.

Bezogen auf die Stadt als gebaute Umwelt muss bei der Betrachtung von Umweltfaktoren unterschieden werden, dass diese sowohl pathogene, also krankmachende Umweltfaktoren beinhalten kann, wie z. B. Luft- und Wasserverunreinigungen, Lärm und Gewalt, aber auch salutogene, d. h. gesundheitsförderliche Faktoren wie urbane Gewässer und Grünräume zur Erholung, hohes Angebot an medizinischer Versorgung und gesundheitsfördernde Einrichtungen wie z. B. Sportvereine (Dannenberg et al. 2011).

Um ein besseres Verständnis von Gesundheit im Spektrum zwischen pathogenen und salutogenen Eigenschaften bezogen auf die gebaute Umwelt und somit auf die Architektur zu erreichen, widmen sich die folgenden Kapitel ausgesuchten Schwerpunktthemen hierzu. Dabei wird auf verschiedenen Betrachtungsebenen, beginnend bei der Mensch-Landschafts-Beziehung, über die Architektursoziologie und Architekturpsychologie bis hin zu empirischen Befunden zum Zusammenhang von Architektur und Gesundheit, das Spektrum der Interaktion von Mensch und Umwelt dargestellt.

3.2.1 Räumliche Dimensionen der Gesundheit - Public Health

Für das menschliche Wohlbefinden ist es nicht gleichgültig, wie der Mensch im Verhältnis zu seiner Umgebung steht. Der Zusammenhang von Gesundheit, Mensch und Landschaft, im Sinne der gebauten Umwelt, hat notwendiger Weise auch immer eine räumliche Dimension (Gebhard und Kistemann 2016). Dabei bildet das Konzept von Antonovsky heutzutage die Grundlage für Theorie und Praxis im Bereich von Public Health (Antonovsky 1979, 1987). Hierbei wird Gesundheit als ein Zustand definiert, der sich ständig in einem dynamischen Prozess der Einwirkung von pathogenen und salutogenen Faktoren befindet. Dies wird als sogenanntes **HEDE-Kontinuum** bezeichnet (Health-Ease – Dis-Ease). Bei Antonovskys Konzept werden im Kern die salutogenesen Modellbereiche herausgearbeitet. Hierbei werden gesundheitsfördernde Ressourcen und die Abwehr von Belastungen zur Krankheitsbewältigung gestärkt. Dabei ist die Erreichung des Zustandes „Gesundheit“ nicht das Ziel, sondern das Mittel, Menschen zu unterstützen, dass gesellschaftliche und individuelle Leben zu fördern (Bengel et al. 1998).

Public Health untersucht im konzeptionellen Ansatz dabei in Praxis und Theorie das Zusammenwirken von Individuen und ihrer Gesellschaft inklusive ihrer Umwelt sowie ihre entsprechende gesundheitliche Rückwirkung und versucht diese positiv zu gestalten (Hurrelmann 2010). In diesem Sinne ist Public Health gesundheitsfördernd bzw. präventiv angelegt. Die Gestaltung der unmittelbaren Lebensverhältnisse, auch im Zusammenspiel mit der gebauten Umwelt, steht dabei durch die Förderung von Gesundheitsressourcen und Reduzierung von Krankheitsrisiken im Mittelpunkt (Schott und Hornberg 2011). Bei einer nachhaltig geführten Gesundheitsausrichtung muss hierbei die gesundheitliche Vulnerabilität (Anfälligkeit) und Resilienzstärkung (Widerstandsfähigkeit) aller Bevölkerungsgruppen im Fokus stehen. In jüngster Zeit werden sogenannte ressourcenfördernde verhaltensorientierte Settings-Ansätze (Gebhard und Kistemann 2016) verfolgt, die in der Lebens-Umwelt zu verorten sind. Hierbei geht es um die Schaffung von räumlichen Voraussetzungen, um die gesundheitsfördernden Aspekte von Public Health im Rahmen gesellschaftlicher Vorhaben zu fördern. Exemplarisch kann hier auf das Ergebnis des Arbeitskreises „Planung für gesundheitsfördernde Stadtregionen“ der deutschen Akademie für Raumforschung und Landesplanung hingewiesen werden. Hierbei wird dafür plädiert, Gesundheitsaspekte als Thema der Quartiersentwicklung im Städtebauförderprogramm des Bundes „Soziale Stadt“ zu verankern (ARL 2014).

*

Im Bereich der sogenannten **Healing Architecture** im Krankenhausbau konnten empirische Studien den Zusammenhang von gebauter Umwelt und Gesundheit aufzeigen. Zur Veranschaulichung exemplarisch nun folgend exemplarische Ergebnisse hierzu: Tageslicht hat einen positiven Genesungseffekt durch die visuellen, biologischen und psychologischen Auswirkungen (Boyce et al. 2003). Patienten in sonnigen Zimmern verweilen im Durchschnitt 2,6 Tage weniger im Krankenhaus als Patienten in dunklen Zimmern (Beauchemin und Hays 1996). Patienten, die in einem helleren Teil des Krankenhauses untergebracht sind, verbrauchen 22% weniger Medikamente als Patienten auf der dunkleren Seite (Walch et al. 2005). Patienten in Zimmern mit Blick auf die Natur benötigen weniger Schmerzmittel nach der Operation im Vergleich zu denen, die in einem Zimmer mit Blick auf eine Backsteinmauer untergebracht sind (Ulrich 1984). Ein regelmäßiger, aber asymmetrischer Grundriss ist leichter zu merken, er reduziert die Frustration bei der Orientierung der Nutzer (Baskaya et al. 2004). Einbettzimmer reduzieren das Risiko von Krankenhausinfektionen (Ulrich et al. 2008).

3.2.2 Räumliche Verortung der Gesundheit – Gesundheitsgeografie

Geht es darum, die zwei Faktoren Gesundheit und Raum mit einer Wissenschaftsdisziplin zu beschreiben, so hilft dabei die Geografie der Gesundheit bzw. Gesundheitsgeografie. Ihre Stärke ist im Kontext der Gesundheitswissenschaften die räumliche Dimension (Schweikart und Kistemann 2017). Sie bezieht den Raum als verbindenden und erklärenden Faktor in die Forschung mit ein. Dabei werden human- wie auch physiogeographische Aspekte miteinander verbunden, um das Zusammenspiel von Raum und Gesundheit mit allen darauf einwirkenden Prozessen beschreiben zu können. Die Forschung findet hierbei an der Schnittstelle von Umwelt und Mensch statt. Die Erforschung der Gesundheit im Kontext des Raumes ist daher nur sinnvoll in einer wissenschaftlich interdisziplinären Zusammenarbeit.

Die Gesundheitsgeografie geht dabei auf die Arbeiten von Leonard Ludwig Finke (Finke 1792-95) und James Lind (Lind 1768) zurück, die erstmals Schwankungen der Faktoren Ökologie, Klima, Zeit und Raum in Bezug zu Krankheiten setzten. Im 17. und 18. Jahrhundert entstanden erste kartografische Darstellungen im Zusammenhang mit Infektionskrankheiten. Mit dieser Methode, Krankheiten kartographisch zu erfassen, entstand im 19. Jahrhundert das wichtigste Instrument der medizinischen Geografieforschung (Scharlach und Crom 2013). Das wohl berühmteste Fallbeispiel in dieser frühen Phase ist die Kartierung der Cholerafälle in London von John Snow (Snow 1855) während eines Ausbruchs im Jahre 1854 (s. hierzu Abbildung 1). Auch hierbei war wiederum die Kartierung das entscheidende Instrument zur Untersuchung der Ursachen der Cholera (Kistemann et al. 1997).

Aus diesen ersten Ansätzen entwickelten sich zwei Schwerpunktbereiche der Gesundheitsgeografie. Auf der einen Seite die sogenannte **Geomedizin**, die auch als geographische Pathologie oder geographische Epidemiologie auf die Ökologie der Krankheiten der Antike zurückzuführen ist. Auf der anderen Seite entwickelte sich die **Geographie des Gesundheitswesens**. Diese beschäftigt sich mit den räumlichen Faktoren der Planung von Gesundheitseinrichtungen und ihrer Akzeptanz sowie Inanspruchnahme (Schweikart und Kistemann 2017). Letztendlich ist es sinnvoll diese zwei Richtungen, die Geographie der Krankheiten und die Geographie des Gesundheitswesens, zum aktuellen Themenkomplex bzw. Konzept der Gesundheitsgeografie zusammenzufassen (Verhasselt 1993).

In jüngster Zeit hat sich die Gesundheitsgeografie der Zusammenarbeit mit benachbarten Disziplinen weiter geöffnet. Dies sind Themenfelder der Gesundheitssystemforschung, medizinischen Anthropologie und Soziologie, Epidemiologie und besonders in der räumlichen Betrachtung von Public Health. Gerade bei dem Ableiten von Methoden aus anderen Wissenschaftsdisziplinen können hier interdisziplinäre Chancen erfolgen. So finden heute geografische Methoden und Ansätze häufiger Anwendung außerhalb der Gesundheitsgeografie im Übertrag zu anderen Wissenschaftsdisziplinen. Zentrale Stärke der Gesundheitsgeografie ist in Bezug auf Architektur die Berücksichtigung der

räumlichen Dimension in ihrer Forschungsbetrachtung. Der methodische, raumdynamische Ansatz ist durch den Einsatz von geografischen Informationssystemen (GIS) gerade in Bezug neuer Möglichkeiten und Perspektiven von interdisziplinären Fragestellungen von großem Nutzen (Verhasselt 1993).

Das **EVAP-Prinzip** (Eingabe, Verarbeitung, Analyse, Präsentation) wurde bereits von John Snow angewendet. Er hat damit die Grundfunktionen eines Geografischen Informationssystems (GIS) vorweggenommen (Bill 2010; Longley et al. 2010). Die damals noch beschränkten Möglichkeiten im 19. Jahrhundert haben sich zu einem starken Werkzeug in der Analyse raumbezogener Gesundheitsdaten weiterentwickelt. Gerade für den Bereich der Kommunikation ist die Visualisierung der Daten und gewonnenen Erkenntnisse von hoher Bedeutung (Cromley 2012). Daher müssen auch in Zukunft gesundheitsgeografische Methoden im Zusammenspiel von Architektur und Infektionsprävention weiterentwickelt werden.

Bereits im Jahr 1992 wies das US-amerikanische Institute of Medicine auf die Bedrohung der Gesundheit vor neuen aufkommenden Krankheitserregern und neuen ansteckenden Krankheiten hin (National Academy of Science 1992). Dabei waren die Faktoren, die eine neue Bewertung der infektionsepidemiologischen weltweiten Situation rechtfertigten, mehrdimensional (Haggett 1994). Die Veränderung von Lebens- und Umweltbedingungen konnten dabei die Verbreitung von Krankheitserregern in beachtlichem Umfang begünstigen (Kistemann und Exner 2000). Die hohe Komplexität von ineinandergreifenden Mechanismen wurde am Beispiel der Ebola-Epidemie in Westafrika in den Jahren 2013 bis 2015 deutlich. Hierbei kamen unterschiedlichste kulturelle, ökologische und soziale Faktoren zusammen (Alexander et al. 2015). Die Biotope von infizierten Tieren wie Flughunde und Fledermäuse und die Biotope der Menschen rückten aufgrund von erhöhter Bevölkerungsdichte mit gesteigertem Nutzungs- und Siedungsdruck weiter zusammen. Der Verzehr von infiziertem Wildfleisch wie auch die Überlagerung von modernen Lebensbedingungen wie Urbanisierung und Mobilität gegenüber traditionellen Lebensweisen wie z. B. bestimmten Bestattungsritualen stellten bei der Ausbreitung von Ebola begünstigende Faktoren dar. Die Epidemie wurde zusätzlich begünstigt durch die schlechte Ausstattung und Ausbildung der entsprechenden Gesundheitssysteme. Auch die Missachtung hygienischer Vorgaben und das mangelnde Vertrauen der Bevölkerung in die Entscheidungen zu Maßnahmen ihrer Regierung förderte die Ausbreitung des Ebola-Erregers.

*

Die Gesundheitsgeografie kann hier bei der Analyse, Beschreibung und Interpretation und im Besonderen durch die räumliche Erfassung der Daten in diesem komplexen Gefüge von Abhängigkeiten und Risikofaktoren zum besseren Verständnis darstellen. Dabei verfügt die Gesundheitsgeografie auf unterschiedlichsten Maßstäben und Ebenen über geeignete Modelle, Konzepte und Methoden zur Analyse und Präsentation. Diese Möglichkeiten bieten wertvolle Chancen, den Bereich der baulichen Infektionsprävention im interdisziplinären Forschungsansatz weiter zu entwickeln.

3.3 Bewegungsmuster Mensch

Bei der Betrachtung von Infektionsketten hat der Mensch zwei Funktionen. Er ist zum einen das letzte Glied in der Kette und quasi Endkonsument als der Erkrankte. Auf der anderen Seite ist der Mensch aber auch Überträger von Krankheiten, also der Wirt. Im Kapitel 1 wurde gezeigt, dass nicht nur die statischen Bauteilkomponenten wie z. B. die materialoptimierten Oberflächen zur baulichen Infektionsprävention beitragen können, sondern, dass gerade bei den direkten Infektionsübertragungswegen das prozessoptimierte räumliche Layout, die Entflechtung von Wegeüberlagerungen oder die distanzwahrende Raumnutzung dies ermöglicht. Um solch ein Layout entwickeln zu können, muss der Planer die Grundzüge über die Entstehung von raum-zeitlichen Bewegungsmustern von Menschen nachvollziehen können, um im Gegenzug eine infektionsprophylaktisch notwendige Distanz der Akteure im gebauten Raum zu ermöglichen.

In den folgenden Kapiteln sollen daher Themen wie Distanz, Orientierung, Raumnutzung, Crowding, Personenstromanalysen bis hin zur Verhaltensänderung in Form von Bewegungsänderungen durch äußere Einflüsse beleuchtet werden.

3.3.1 Anthropologie - Umwelt und Gesundheit

Krankheit und Gesundheit wurde bereits bei Hippokrates von Kos (460-377 v.Chr.) in eine Beziehung zur Natur und Umwelt gestellt (Völker 2016). Dabei wurden bereits Zusammenhänge zwischen dem Gesundheitszustand von Bevölkerungen sowie von Wasserqualität, Jahreszeiten und klimatischen Bedingungen aufgezeigt. Bereits der römische Ingenieur und Architekt Vitruv (80-15 v. Chr.) erkannte die heilsame Wirkung von Gegenden, die „*salubritates regionum*“. So empfahl er z. B. zunächst den Gesundheitszustand von Bewohnern von Quellgebieten zu untersuchen, bevor man von dort eine Wasserversorgung in Richtung einer römischen Siedlung planen ließe (Kistemann und Claßen 2003).

In der Neuzeit kann der Sammelband „Behavior and the Natural Enviroment“ (Altman und Wohlwill 1983) als Meilenstein in der Mensch-Landschafts-Forschung in Bezug auf die Bewertung von gebauter städtischer Umwelt und ihre psychologisch mentale – gesundheitliche Wirkung betrachtet werden. Argumentativ werden hierbei häufig die biologischen Überlebensanforderungen der früheren Menschheitsgeschichte zur Beschreibung der Mensch-Umwelt-Beziehung, die auch als Mensch-Landschafts-Verhältnis bezeichnet wird, herangezogen. Dabei basieren evolutionäre und anthropologische Theorien auf der Annahme, dass bestimmte Umwelt- bzw. Landschaftskompositionen aufgrund evolutionärer Prägung bevorzugt ausgewählt werden (Völker 2016).

Dabei war für das Überleben des Individuums von entscheidender Bedeutung, wie ausgeprägt die Fähigkeit zur Verarbeitung zahlreicher gleichzeitiger visueller Informationen war (Ulrich 1977). Dabei ging es darum, die Umwelt optisch schnell zu erfassen, das Gesehene für die eigenen Belange zu bewerten und dementsprechend zu handeln. Die große Fülle an Eindrücken und Informationen, die dabei verarbeitet werden muss,

kann vom Menschen nicht vollständig erfasst werden und muss daher in Einzelinformationen zerlegt und gefiltert werden (Gibson 1979). Aus diesem Grund fokussiert sich der Mensch bei der Betrachtung der Umwelt auf einzelne ausgewählte spezifische Elemente.

Es gibt unzählige anthropologische Theorien zur Mensch-Umwelt-Beziehung. Aus diesem Grund sollen nur drei dieser Theorien exemplarisch zum weiteren Verständnis kurz vorgestellt werden.

*

Die **Habitat Selection Theory** besagt, dass bestimmte Landschaftselemente, evolutionsbiologisch bedingt, ausgewählte positive Reaktionen beim Menschen hervorrufen können (Orians 1980). Dabei geht es um die erste Reaktion auf eine Landschaft und in wie weit diese für das Überleben und die Reproduktion des Menschen bewertet wird. Hierbei können verschiedene Umweltkonstellationen bzw. Landschaftsmuster unterschiedlichen Interessen dienen. So ist z. B. eine weitläufige Landschaft mit erhöhtem Ausblickort zur schnellen Erkundung und Orientierung für Jäger und Sammler von Vorteil (Orians und Heerwagen 1992). Ebenso wurden Lebensräume bevorzugt in denen Seen, Bäche und Flüsse als Wasserressource dauerhaft zur Verfügung standen. Die *Habitat Selection Theory* gilt damit als Ausgangstheorie für zahlreiche Studien zur Erläuterung von subjektiven Empfindungen und Reaktionen auf bestimmte Umweltreize (Völker 2016).

Verdichtet wurde die zuvor beschriebene Theorie zur sogenannten **Savannen-Theorie** (Orians 1986). Darin wurde formuliert, dass der Mensch, ohne auch vorher Kontakt zu dieser Landschaft gehabt zu haben, die Savanne als zu bevorzugenden Landschaftstyp präferieren würde. Diese Entscheidungsfindung sei evolutionär begründbar und somit für alle Menschen genetisch festgeschrieben. Die in der Savanne vorgefundene Vegetation schafft für den Menschen eine optimale Umgebung zum Überleben. Ihre gute Übersichtlichkeit ermöglicht eine schnelle Erkundung und Orientierung. Die Annahmen dieser Theorie wurden durch die Analyse des Verhaltens der Entdecker und Siedler in Nordamerika bestätigt. Diese neuzeitlichen Siedler präferierten savannenähnliche Landschaften. Dabei bevorzugten sie eine Mischung aus Offenland und Baumgruppen kombiniert mit Aussichtspunkten mit Blick auf Seen und Flüsse. Auch ist zu beobachten, dass Menschen unterschiedlichster Kulturen ihre Umwelt nach dem Prinzip der Savanne umgestalten. Dabei werden Baumgruppen mit Offenland und Zugänglichkeit zu Wasser kombiniert.

*

Die **psychoevolutionäre Theorie** (Ulrich 1983) befasst sich mit der Fragestellung, in wie weit natürliche Umgebung die Gesundheit bzw. Erholung des Menschen fördert. In dieser Theorie wird postuliert, dass evolutionsbiologisch bedingt das menschliche Gehirn besser dazu geeignet ist, eine effiziente Verarbeitung von Informationen aus der natürlichen Umwelt vorzunehmen und diese dementsprechend leichter verarbeiten

könne. Wenn der Mensch im Gegenzug Informationen bzw. Reize aus der nicht-natürlichen Umwelt verarbeiten muss, erschöpft er kognitiv und physiologisch schneller. Die positiven affektiven Reaktionen auf natürliche Reize werden wiederum über die Themen Wasser, Nahrung, Schutz und Sicherheit ausgelöst. Die visuellen Eigenschaften der Umwelt bei dieser Theorie werden über die Begriffe Komplexität, strukturelle Eigenschaften wie z. B. räumliche Ordnung bzw. Unordnung, Gefahrenpotential, Weiträumigkeit, Fix- bzw. Fokuspunkte zur Betrachterlenkung sowie Oberflächenstruktur definiert (Völker 2016).

Die psychoevolutionäre Theorie konnte empirisch gestützt werden. Durch eine Studie konnte die Rekonvaleszenz von Patienten nach einer Operation bei unterschiedlichem Ausblick aus dem Patientenzimmer untersucht werden (Ulrich 1984). Es stellte sich heraus, dass die Patienten mit Blick auf eine natürliche Landschaft gegenüber Patienten mit Ausblick auf eine Backsteinwand in besserer mentaler Verfassung waren, geringer gegenüber Stressempfinden reagierten und zeitlich schneller genesen waren.

*

Die Anthropologie kann mit ihren evolutionären Theorien dabei helfen, das Verhalten des Menschen in Bezug auf seine Umwelt zu erklären. Mit Umwelt ist im heutigen Kontext auch die gebaute Umwelt zu verstehen. Unsere heutigen Bewegungsmuster und Präferenzen für bestimmte gebaute Umweltsituationen haben ihren Ursprung aus einer Zeit, in der das Überleben durch die Fähigkeit der schnellen Orientierung im Raum und Bewertung der Lage geprägt war.

3.3.2 Architektursoziologie

Im Kapitel 1 wurde die verfahrenstechnische Seite der Infektionsübertragung wie z. B. von Mensch zu Mensch oder Oberfläche zu Mensch beschrieben. Bei vielen dieser Übertragungen wie z. B. der Tröpfchen- oder Kontaktinfektion spielt der räumliche Faktor der Distanz eine entscheidende Rolle bei der Übertragung. Der persönliche Umgang mit dieser Distanz unterliegt unterschiedlichsten Kriterien wie etwa der kulturellen Einbettung der Situation. Ein Blick in die Architektursoziologie soll hierbei zur Erkenntnisgewinnung im Hinblick auf mögliche bauliche Infektionspräventionsstrategien genutzt werden.

Die **räumliche Distanz**, auch geprägt durch die individuelle Bewegung im Raum, ist hierbei Teil jedweder sozialen Interaktion. Dieses soziale Handeln hat immer einen räumlichen und zeitlichen Bezug (Schäfers 2014). Die Architektursoziologie beschäftigt sich demnach mit dem Zusammenspiel von sozialem Handeln und gebauter Umwelt. Dem unterschiedlichen kulturellen Hintergrund der handelnden Akteure kommt hierbei eine besondere Bedeutung zu. Dies drückt sich in den unterschiedlichen, sogenannten, **Raumnutzungsmustern** aus.

Bei der Architektursoziologie gibt es unterschiedlichste theoretische Ansätze. Für den Bereich der baulichen Infektionsprävention wird hier exemplarisch auf die Ansätze

der Prozess- und Figurationssoziologie hingewiesen. Diese Theorien werden erstmals in Norbert Elias Werk *Über den Prozess der Zivilisation* (Elias 1997) entwickelt. So ist hierbei soziales Handeln immer als zusammenhängende Verflechtungssituationen, er nennt es *Figurationen* oder *Interdependenzgeflechte*, zu verstehen. Aufgrund sich immer wieder erweiternder oder ablösender zivilisatorischer Verhaltensnormen verändern sich mit ihnen auch die Figurationen. Dadurch wiederum veränderte sich das Raumnutzungsverhalten bzw.-muster durch die Zunahme von z. B. schambedingten räumlichen Schwellen im geschlechterbedingten persönlichen Umgang. So konnte beispielhaft der Wandel der Raumnutzungsmuster im Wohn- und Arbeitsbereich durch die Veränderung der kulturellen und sozialen Prozesse im Zeitraum vom 17. Jahrhundert bis zur Jetztzeit analysiert werden (Weresch 2005).

Die Soziologie der Architektur hat erkannt, dass Raum als Grundkategorie nicht nur für die Architektur, sondern viel mehr auch für die Mathematik und Physik, die Geografie, die Sozial- und Verhaltenswissenschaften, die Anthropologie und Wahrnehmungspsychologie, die Ästhetik, die Philosophie und weiteren Disziplinen von immanenter Bedeutung ist. Für die Architektur sind die Erkenntnisse zum Raumverständnis dieser Wissenschaftsdisziplinen ein Grundstein ihrer eigenen Raumentwicklung (Schäfers 2014).

Raum in der Soziologie wird als **Strukturierungselement sozialer Interaktion** beschrieben (Hamm und Neumann 1996). Der Mensch bewegt sich dabei von der nicht bebauten Umwelt, der klassischen Natur, über den kultivierten Raum des Infrastruktur- und Siedlungsbaus bis hin zu dem einzelnen Raum, den Vier-Wänden. Menschliche Aktivitäten werden hierbei durch den gebauten Raum sowohl behindert oder animiert sowie auch erweitert oder begrenzt. Der Raum ist damit Teil der sozialen Definition der Situation. Durch den Raum werden Nähe und Distanz bestimmt und damit wiederum alle dort stattfindenden Sozialverhältnisse (Simmel 2006).

Aus anthropologisch-soziologischer Betrachtung kann man den Raum bzw. das Verhalten im Raum nach bestimmten sogenannten **Territorialverhalten** beschreiben. Ein Musterbeispiel solch eines territorialen Verhaltens ist hierbei das *Wohnen*. Beschreibungen von typischen Raumnutzungsmustern und menschlichen Territorien aus anthropologisch-soziologischer Sicht finden sich bei Edward T. Hall „Die Sprache des Raumes“ (Hall und Dixon 1976) und Erving Goffman „Das Individuum im öffentlichen Austausch“ (Goffman und Wiggershaus 1974).

Hall definiert dabei **vier Distanzen** als Territorien wie folgt (Schäfers 2014):

1a) „*Die intime Distanz – nahe Phase*“; körpereigen und hautnah; Berührungen bedürfen der Übereinkunft und Einwilligung;

1b) „*Die intime Distanz – weite Phase*“; ca. 15 - 45 cm; ein Eindringen in diesen körpereigenen Raum bedarf der – kulturspezifischen – Verständigung;

2a) „*Die persönliche Distanz – nahe Phase*“; ca. 45 - 75 cm; andere Menschen sind quasi noch in Griffweite; so erlauben nur besondere Situationen – z. B. im Kino – ein Eindringen in diesen Distanzbereich;

2b) „*Die persönliche Distanz – weite Phase*“; ca. 75 - 120 cm; hier werden die anderen bereits „auf Armlänge“ ferngehalten; „die Grenze der körperlichen Herrschaft im eigentlichen Sinn“ ist erreicht;

3a) „*Die soziale Distanz – nahe Phase*“; ca. 120 - 220 cm; dies sei die Entfernung für die Abwicklung unpersönlicher Geschäfte;

3b) „*Die soziale Distanz – weite Phase*“; ca. 220 - 360 cm; die Distanz signalisiert eine gewollte Formalisierung der interpersonalen Aktivitäten (z. B. Büro des Chefs);

4a) „*Die öffentliche Distanz – nahe Phase*“; ca. 360 - 750 cm;

4b) „*Die öffentliche Distanz – weite Phase*“; über 750 cm.

Alle beschriebenen Distanzen beeinflussen das menschliche Raumverhalten aufgrund spezifischer Empfindungen. Ausgangspunkt dieser Empfindlichkeiten reichen von den Extremitäten (Arme und Beine) über das Gesichtsfeld der Wahrnehmung bis hin zu anderen Sinnesorganen wie z. B. dem Geruchssinn. Das Verständnis über die oben beschriebenen Distanzen hilft bei der Planung auch unter infektionspräventiven Gesichtspunkten. Dabei muss der kulturspezifische Hintergrund der Handelnden berücksichtigt werden, da z. B. in Japan ein anderes Verständnis für Nähe oder Dichte gegenüber Deutschland herrscht. Diese Begriffe wie Nähe, Dichte, Enge, öffentlich oder privat sind dabei als Positionsbestimmung von Menschen im Raum und ihre Distanzwahrung zu anderen Individuen zu sehen.

Die Wechselbeziehungen von sozialem Verhalten und gebauter Umwelt wurden als sogenannte **Behavior Settings** von Roger Barker beschrieben (Barker 1968). Dabei ging es darum, dem *humanen Bauen* ein wissenschaftliches Fundament zu geben. Eingebettet war dies in der Ökologischen Psychologie bzw. Umweltpsychologie der 60er und 70er Jahre (Schäfers 2014). Die unterschiedlichen Settings wurden als charakteristische Situationen beschrieben, wie z. B. in einer Schule oder einem Wartezimmer, bei denen der Nutzer aufgrund bekannter Funktionen der Orte bzw. Situationen ein spezifisches Verhalten durchführt. Bei den Studien wurde erkannt, dass komplexe Umweltsituationen bestimmte wiederkehrende Verhaltensmuster erzeugen, die von Barker bezeichneten *standing patterns of behavior*. Anders herum betrachtet bedeutet dies auch, dass bestimmte *Behavior Settings* entsprechende Verhalten hervorrufen, die wenig Abweichung im Verhalten aufgrund individualpsychologischer Faktoren erlauben.

Gerhard Kaminski erkennt das Potential der Studien von Barker bezogen auf die Raumnutzungsmuster (Kaminski 1990), weist aber darauf hin, dass die *Behavior Settings* in der Praxis aufgrund ihrer hohen Komplexität selten weiterverfolgt wurden.

Im gleichen Zuge kann man die Ausführungen von Max Weber heranziehen, um das Verständnis von Raumnutzungsmustern weiter zu relativieren (Weber und Winckelmann 1976). Er bezeichnet es als *Chance*, dass die Art der sozialen Interaktion durch den gebauten Raum mitbestimmt wird. Manche Räume sind förderlicher als andere in Bezug auf ein spezifisches Sozialverhalten. Insgesamt ist für Weber die Anzahl der situationsbedingten einfließenden Variablen zu groß, um eine exakte kausale Beziehung von Raum und Sozialverhalten zu bestimmen. Zu diesen Variablen zählen z. B. Sozialisation und Alter der agierenden Personen, ihre Einstellung und Motivation oder gruppendynamische Prozesse (Schäfers 2014). Beispielhaft kann hier die besondere Situation der Enge in Gefahrensituationen herangezogen werden. Hierbei wird z. B. sehr unterschiedlich auf den Ausbruch einer Panik reagiert. Erlernte Verhaltensmuster, auch in Bezug auf die Raumnutzung, werden zugunsten instinktiver Reaktionen, wie Fluchtverhalten, verworfen. Problematisch bei der Voraussage ist hierbei zusätzlich die interkulturelle Sichtweise zu Körperterritorien bzw. Distanzen und ihren entsprechenden Raumnutzungsmustern.

Die unterschiedliche meist interkulturelle Auffassung von Dichte und Enge bzw. Distanzwahrung und Körperterritorium ist Ausgangspunkt für sehr unterschiedliche Verhaltensweisen im Zusammenhang mit Raumnutzungsmustern. Im Umkehrschluss führt dies aber auch zu unterschiedlichen Sichtweisen in Bezug auf Raum und Sozialverhalten. Die Gestaltung von Gebäuden, wie z. B. im Wohnbereich, ist hierdurch kulturell sehr unterschiedlich geprägt. So spielt in Japan der Punkt in der Raumorientierung eine primäre Rolle, im westlichen Kulturkreis dagegen eher die Strecke im Raum zwischen zwei Punkten. In Japan haben Straßenkreuzungen einen Namen, die eigentliche Straße aber nicht. Ebenso kann beispielhaft an Japan gezeigt werden, dass auch die funktionale Zuweisung von Räumen kulturspezifisch differenziert betrachtet werden muss (Schäfers 2014). In Japan können Zimmer kurzfristig durch Schiebewände und mobile Einrichtungsgegenstände an wechselnde funktionale Bedürfnisse angepasst werden.

Vergleichend kann man auch die kulturellen Unterschiede bei der Akzeptanz von Dichte und Enge bzw. Körperkontakt in arabischen oder westlichen Städten aufzeigen. Auf den Basaren bzw. Märkten arabischer Städte herrscht eine menschliche Dichte, die mit europäischen Maßstäben von Distanzwahrung und Körperterritorium nur schwer zu vereinbaren ist. Die Vorstellung von *persönlichem Raum* ist dabei unterschiedlich ausgeprägt.

Bei Menschen aus dem arabischen Bereich liegt *das Selbst* innerhalb des Körpers und kann daher durch Körperberührung gewissermaßen nicht erreicht werden. Wie auch in Japan wird die Form der Verinnerlichung und Versenkung auch im öffentlichen Bereich praktiziert. Über eine körperbetonte Symbolsprache wird dabei z. B. kommuniziert, wenn persönliche Ruhe erwünscht ist. Hall beschreibt diesen Zusammenhang von

kulturellem Raumverständnis als **Proxemik im Kulturvergleich** (Hall und Dixon 1976). Dem Verstehen von kulturellen und religiösen Besonderheiten im kulturvergleichenden Blick auf Raumterritorien sind dabei aber aufgrund ihrer Komplexität Grenzen gesetzt (Schäfers 2014).

In der Betrachtungsebene des Städtebaus gibt erstmals der österreichische Städtebauer und Architekt Camillo Sitte detaillierte Hinweise für das Verständnis des Raumerlebnisses und der Raumwahrnehmung besonders bezogen auf die städtebauliche Platzgestaltung im öffentlichen Raum (Sitte 1889). Auf der reinen Raumwahrnehmung bzw. Ästhetik des Camillo Sitte baut Hans Paul Bahrtdt seine sozialen verhaltensspezifischen philosophischen Grundlagen auf (Bahrtdt 1961). Dabei beschreibt er die Fähigkeit des Menschen im öffentlichen Umgang miteinander. Er charakterisiert die besondere Fähigkeit des repräsentierenden und darstellenden Verhaltens der Städter, die erforderlich ist, um in der anonymen urbanen Masse die erforderliche Distanzwahrung zu schaffen (Bahrtdt und Herlyn 1998). Dieses Verhalten ermöglicht erst die Bildung einer Atmosphäre der Öffentlichkeit. Im Spannungsfeld von Öffentlichkeit und Privatheit spielt der städtebauliche Platz eine zentrale Rolle und bildet die Grundlage für urbanes Verhalten bzw. Urbanität.

Thorsten Bürklin und Alban Janson beschreiben in einer phänomenologisch orientierten Untersuchung die Interaktion von Menschen mit dem architektonischen Raum beispielhaft mittels des Verhaltens von Menschen auf venezianischen Plätzen (Janson et al. 2002). Dabei wird das Raumerleben beim Betreten des Platzes durch das Überlagern von drei Ereignissen systematisch gegliedert. Ausgangspunkt ist die Platzgestaltung selbst, dazu gesellt sich der eigentliche Bewegungspfad des Agierenden und zuletzt sein Körperverhalten. Dies ist von entscheidender Bedeutung für das sinnhafte Erleben des Raumes. Die Untersuchungen bekräftigen die anthropologischen Vorraussetzungen für das architektonische Raumerleben. Wie bereits bei Bahrtdt wird auch hier das Verhalten im urbanen Raum der Plätze nur begreifbar, wenn es als repräsentierend bzw. darstellend verstanden wird. Die bühnenartige Gestaltung der venezianischen Plätze kommt diesem Bedürfnis des *Auftritts* sehr entgegen.

Schäfers stellt in seiner Abhandlung zur Architektursoziologie fest, dass nicht nur die gebaute Umwelt einen Einfluss auf das soziale Verhalten des Menschen hat, sondern auch Teile hiervon in ihrer Zeichenhaftigkeit als abstrahierte Elemente der Architektur in Form von z. B. Tür bzw. Schwelle, Säule, Fenster etc. gezielt eingesetzt werden können (Schäfers 2014). Diese Zeichen und Symbole der Gebäude können die entsprechende Funktion ablesbarer und für den Menschen bedeutungsreicher gestalten und damit auch die Nutzer dieser Architekturen beeinflussen. Beispielhafte Zeichen bzw. Symbole können Kuppeln für Repräsentationsbauten wie Kirchen oder Amtssitze, hohe Türme und Gebäude sowie große Stadtplätze für Staatsempfänge sein.

Die Grundlage für die Semiotik als Lehre für sprachliche und nichtsprachliche Zeichensysteme schaffte Charles W. Morris mit seiner **Theorie der Zeichen** (Morris

1979). Dabei gliederte er die Semiotik in drei Hauptgebiete. Die *Syntaktik* als Beziehungen, die die Zeichen zueinander haben. Sie wird auch Syntax sowie grammatikalisch und sprachwissenschaftlich *die Satzlehre* genannt. Als zweites die *Semantik* als die Beziehungen zwischen Zeichen und Bezeichnetem im Hinblick auf Bedeutung bzw. Sinn. Und zuletzt die *Pragmatik* als die Beziehungen zwischen Zeichen, Bezeichnetem und Benutzer.

Der Schriftsteller und Wissenschaftler Umberto Eco erweiterte die Semiotik über die Sprachwissenschaft hinaus in den Bereich der Architektur. In seinem Werk *Einführung in die Semiotik* (Eco und Trabandt 1972) beschreibt er die **Semiotik der Architektur**. Kern seiner These ist der Begriff des *Codes*. Dieser *Code* regelt die Wechselbeziehung von Ausdruckselementen zu Inhaltselementen (Eco 1977). Sie dienen der Verständigung und werden im Sozialisationsprozess erlernt. Dabei können *Codes* Symbole, Wörter und Gesten sein. Entscheidend dabei ist, dass mindestens zwei oder mehrere Menschen einen spezifischen *Code* und damit ein bestimmtes Zeichen auf gleiche Weise interpretieren. Bei dieser architektonischen Zeichensprache unterscheidet Eco primäre und sekundäre Funktionen. Ein bestimmtes Raumprogramm wird über die **Denotationen**, die primären Funktionen, transportiert. Dies können z. B. die Nutzung, Formen des Zugangs, kulturelle Werte, soziale Hierarchien oder Symbolsysteme sein. Die **Konnotationen** als architektonische Zeichen sekundärer Funktionen sind aufgrund ihrer subjektiv empfundenen ästhetischen Qualitäten und mitklingenden Bedeutungen schwieriger zu strukturieren und zu entschlüsseln (Müller 1983). Bei der Interpretation einzelner Elemente im architektur-semiotischen Ansatz werden Zeichen mit Hilfe von konstruktiven, materialtechnischen, maßstäblichen und funktionalen Inhalten erzeugt. Mögliche Beispiele sind hierbei die Symmetrie, bestimmte konstruktive Parameter wie die Säule, der goldene Schnitt, die gewählte Materialität, Öffnungen, Schwellen und Geometrien wie z. B. beim Dach.

Als letzten Schritt im Mensch-Raum-Verhalten sei hierbei auf die **Zeichensprache der Piktogramme** hingewiesen. Sie ermöglichen eine rein visuelle Kommunikation zur besseren Orientierung des Menschen im Raum und Zuweisung von Funktionsbestimmung entsprechender Gebäude. Sie ist losgelöst von jeglichen Sprach-, Kultur- und Bildungsstandards und damit weltweit verständlich. Ausgangspunkt für heutige Piktogramme ist der Begriff der **ISOTOPE**. Er steht für **I**nternational **S**ystem **O**f **T**ypographic **P**icture **E**ducation und begründet sich in der *Wiener Methode der Bildstatistik* des Wiener Soziologen Otto Neurath. Darauf aufbauend entwickelte Otl Aicher die weltweit bekannten Piktogramme für die Sport-Olympiade 1972 in München.

*

Abschließend kann festgehalten werden, dass die Architektursoziologie im Rahmen der baulichen Infektionsprävention gerade im Bereich der interkulturellen Beschreibung der Distanz im Zusammenspiel von gebauter Umwelt und menschlichem Verhalten gute

Anreize für zukünftige Lösungsstrategien in diesem Bereich geben kann. Auch das Verständnis im Umgang mit Zeichen, Piktogrammen bzw. der Semiotik der Architektur wird die menschliche Raumorientierung im Sinne der gerichteten Wegeführung einer Infektionspräventionsstrategie stärken.

3.3.3 Architekturpsychologie

Im Zusammenspiel von Raum, Mensch und Gesundheit kann auch die Architekturpsychologie mit ihren Thesen und Konzepten zum besseren Verständnis für die bauliche Infektionsprävention beitragen. Wie auch schon bei der Architektursoziologie kann auch hier die Architekturpsychologie das Verhalten des Menschen in der Interaktion mit dem Raum bzw. der gebauten Umwelt beschreiben. Dieses Verständnis kann wiederum bei der Betrachtung der direkten aber auch indirekten Infektionsübertragung besonders hilfreich sein. Die Architekturpsychologie wird als die Lehre vom Verhalten und Erleben des Menschen in der gebauten Umwelt definiert (Richter 2008). Ziel der Architekturpsychologie ist demnach, dass menschliche Verhalten und Erleben in diesem Zusammenhang zu beschreiben, zu erklären, nach Möglichkeit vorherzusagen und besonders hilfreich für den Bereich der baulichen Infektionsprävention sogar evtl. zu verändern.

Bei der Architekturpsychologie ist dabei von zwei grundsätzlich unterschiedlichen Perspektiven des menschlichen Verhaltens auszugehen. Auf der einen Seite wird das menschliche Verhalten in Bezug auf Architektur bzw. die gebaute Umwelt *proaktiv* gestaltet, wie z. B. durch die Arbeit des Architekten selbst. Der Mensch ist hierbei der bewusste Gestalter von gebauter Umwelt (Hacker 2005). Auf der anderen Seite steht das von der Architektur abhängige *reaktive* Verhalten. Der Mensch ist hierbei der Nutzer der gebauten Umwelt, d. h. seine Rolle als z. B. Mieter oder Besucher von öffentlichen Gebäuden entspricht der Perspektive im Sinne des *Behaviorismus*, des teilbewussten gewohnheitsmäßigen Alltagsverhalten (Watson 1913). Im Folgenden werden zum besseren Verständnis ausgewählte Theorien der Architekturpsychologie in Bezug auf die sogenannte Mensch-Umwelt-Einheit bzw. Mensch-Umwelt-Beziehungen dargestellt.

Ausgangspunkt vieler auch neuzeitlicher Theorien ist die **Feldtheorie nach Kurt Lewin** (Lewin 1936). Die Feldtheorie beschreibt ein dynamisches Modell zur Analyse von sozialem und individuellem Verhalten, das Grundbegriffe der Gestaltpsychologie, die sich mit der Erforschung von Denken, Wahrnehmungsvorgängen und Gruppendynamik beschäftigt, mit den physikalischen Komponenten *Kraft* und *Feld* verbindet. Diese Komponenten wie auch das soziale Verhalten sind topologisch darstellbar und können mathematisch beschrieben werden: $V = \int (P, U)$. Wobei V das Verhalten, P die Person, U die Umwelt beschreibt. Bei dieser Funktion sind P und U wechselseitig abhängige Größen. Der Lebensraum wird hierbei mathematisch als topologischer Raum definiert. Der agierende Mensch ist damit eine Teilmenge des Raumes, der geometrische Raum seines psychologischen Feldes wird mathematisch funktional durch eine

Jordan-Kurve abgegrenzt. Bei seiner Feldtheorie geht Lewin daher davon aus, dass Verhalten immer zielgerichtet ist und daher über oben genannte Funktion beschrieben werden kann. Der Lebensraum des Menschen ist dabei immer eine Einheit aus der Person selbst und seiner gebauten Umwelt. Untergliedert wird der Lebensraum in einzelne Regionen, die unterschiedlich starke psychologische Barrieren und unterschiedliche Aufforderungscharakter für den Menschen besitzen. Als Aufforderungscharakter wird hierbei die Eigenschaft eines Zieles, eine bestimmte Handlung auszulösen, definiert. Wie in der mathematischen Gleichung ist das konkrete Verhalten des Menschen im Raum somit die Resultierende von abstoßenden und anziehenden Feldkräften, die auf die Person einwirken. Lewin versucht zwar den Lebensraum mathematisch zu definieren, weist aber selbst darauf hin, dass dieser in seiner besonderen Art immer nur aus Sicht des jeweiligen Individuums besteht. Beispielhaft kann hier der weiterentwickelte und vielschichtigere Lebensraum eines Erwachsenen gegenüber dem eines Kleinkindes angeführt werden. Die Feldtheorie ist durch die Herausarbeitung der Situationswahrnehmung und ihrer Bewertung durch die Individualität des Menschen ein wichtiger Vorreiter im Bereich der kognitiven Psychologie. Sie ist damit Rahmentheorie zur Bearbeitung von handlungs- und motivationspsychologischen Fragestellungen. Lewin begründet hierdurch die Umweltpsychologie, die auch ökologische Psychologie genannt wird, sowie die Aktionsforschung und schuf damit die Vorläufer zu wichtigen Erkenntnissen der Gruppenpsychologie (Lück 1996). Diese Erkenntnisse aus dem Bereich der Gruppendynamik in Extremsituationen wie dem sogenannten *Crowding* (Auswirkungen bei Beengungsstress) sind für die bauliche Infektionsprävention im Sinne einer kontaktlosen und distanzwahrenden Raumnutzung hilfreich.

*

Wie bereits bei der Architektursoziologie findet der **Behavior-Setting-Ansatz nach Roger G. Barker** (Barker 1978, 1987), ein Schüler Lewins, auch in der Architekturpsychologie seine Beachtung. Da dieser Ansatz bereits im Kapitel Architektursoziologie beschrieben wurde, hier die kurze Definition aus psychologischer Sicht: Das Behavior-Setting beschreibt die Verhaltensunterschiede beim Hinüberwechseln von einem Umweltkontext zum nächsten. So verhält sich z. B. ein Kind in einer Unterrichtsstunde grundlegend anders als beim Einkaufen. Die Behavior-Settings als überindividuelle-systemare Kontexte beeinflussen dabei das individuelle Verhalten des Menschen. Bei der von Barker entwickelte Behavior-Setting-Analyse werden diese charakteristischen Verhaltensweisen von Personen in festgelegten sozialen gebauten Umwelten wie Kaufhäusern, Bibliotheken oder Gaststätten beschrieben, nachvollzogen und ausgewertet.

*

Das **Drei-Ebenen-Konzept der Mensch-Umwelt-Regulation nach Alfred Lang** (Lang 1988, 1992) baut auf den zwei zuvor genannten Theorien der Umweltpsychologie auf, bezieht dabei aber die gebaute Umwelt stärker mit ein. Lang geht hierbei ebenfalls von der Dialektik der Mensch-Umwelt-Beziehung aus, hier im speziellen auch als Mensch-

Umwelt-Einheit charakterisiert (Richter 2008). Bei dieser Betrachtung ist menschliches Verhalten immer gleichzeitig sowohl intern, biologisch und psychisch-kognitiv, als auch extern, materiell und sozial-kulturell, zu verstehen. Das menschliche Handeln hinterlässt dabei Spuren, intern im Gedächtnis, extern in der Umwelt. Dabei beschreibt Lang die gebaute Umwelt als externen Speicher der Erfahrungsgeschichte des handelnden Menschen. Auch hier *repräsentiert* die gebaute Umwelt etwas, sie hat eine eigene Sprache und löst beim Menschen unterschiedliche Emotionen aus (Richter 2008). Eine Mauer symbolisiert z. B. Abgrenzung, eine Nische erzeugt ein Gefühl von Schutz und Geborgenheit. Somit wird die gebaute Umwelt zum Träger sozialer Regulationsprozesse. Lang differenziert hierbei drei Ebenen der Regulation.

Die erste Ebene beschreibt den Einfluss der gebauten Umwelt auf das akute menschliche Empfinden. Diese Ebene wird auch *Aktiviation* genannt. Diese Einwirkung geschieht zumeist unbewusst und kann daher kaum beeinflusst werden. Die Wirkung kann beruhigend aber auch anregend auf das menschliche Verhalten wirken. Die schon im Vorfeld vielfach zitierte Studie von Ulrich, dem schnelleren Genesungsprozess nach Operationen aufgrund des Ausblicks in die Naturlandschaft (Ulrich 1984), kann als ein Beispiel von *Aktiviation* genannt werden.

Die *Interaktion* als zweite Ebene der Mensch-Umwelt-Regulation geht auf die sozial-regulative Funktion der gebauten Umwelt ein. Dabei bewegt sich der Mensch zwischen den zwei Extremen von Autonomie und Interaktion. Quantität und Qualität menschlicher Kommunikation und Kooperation werden hierbei durch bauliche Komponenten beeinflusst. Dieses Verhalten ist gerade wiederum auf die menschliche Distanz zueinander und ihren Einfluss auf eine mögliche bauliche Infektionsprävention erkenntnisreich.

Die dritte Ebene der Regulation, die *Entwicklung*, beinhaltet einen dynamischen Faktor. Dabei wird über einen längeren Zeitraum hinweg die wechselseitige Beziehung von Umwelt und Mensch beschrieben. So erhält z. B. die eigene gestaltete Wohnumwelt eine kommunikative Funktion, da der Mensch in seiner Persönlichkeitsentwicklung den Wunsch verspürt, sein eigenes, dynamisch verändertes, Selbstverständnis nach außen zu repräsentieren bzw. darzustellen (Richter 2008).

*

Die **Theorie der Handlungsregulationen** kann sehr differenziert das Zusammenspiel der komplexen Strukturen und Prozesse in der Interaktion von gebauter Umwelt und Mensch transportieren. Diese Theorie ist stark beeinflusst von der Kybernetik (Wiener 1958, 1963). Die Psychologen Miller, Galanter und Pribram wandten als erste die Grundvorstellung des kybernetischen Regelkreises auf das menschliche Verhalten an (Miller et al. 1960). Die von dieser Arbeit stark beeinflussten Forscher sind zahlreich, daher soll im Sinne der baulichen Infektionsprävention auf die Arbeiten von Winfried Hacker und Donald A. Norman Bezug genommen werden. Norman wandte die Theorie der Handlungsregulationen bei Alltagsgegenständen an (Norman 1988, 1989), Hacker für den Bereich der Arbeit (Hacker 1973, 2005). Die Abbildung 9 zeigt Hackers Ableitung des kybernetischen Regelkreises auf die Theorie der Handlungsregulationen.

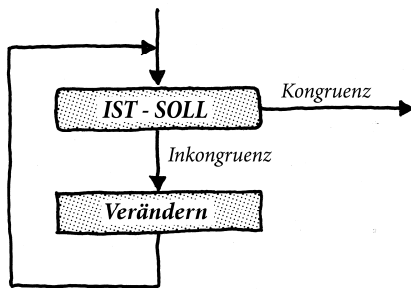


Abbildung 9: VRR-Einheit; Vergleichs-Veränderungs-Rückkopplungs-Einheit nach (Hacker 1973); Darstellung in Anlehnung an (Richter 2008)

Norman (Norman 1989) beschreibt, dass mindestens sieben Stadien für eine vollständige Handlung durchlaufen werden müssen. Diese sind wiederum in einem Regelkreislauf miteinander verbunden (s. Abbildung 10). Dabei geht der Mensch in seinem Verhalten bzw. Handeln in der Regel von einem vorher bewusst gedanklich vorweggenommenen Ziel aus. Diese Ziele können aber nur dann erreicht werden, wenn ein dauerhaftes Abgleichen zwischen dem, was als Ziel definiert wurde, und dem, was tatsächlich passiert, stattfindet (Richter 2008). Daher ist die Wahrnehmung und Bewertung der Zustandsveränderung der Welt unumgänglich. Bei diesem Vorgang ist besonders zu prüfen, ob die Annäherung an das definierte Ziel durch die ausgeführten Handlungsabfolgen tatsächlich erreicht wird. Das hier gezeigte zyklische Modell der Handlungsabläufe bietet aber keine vollständige Theorie der Handlungen. Die definierten sieben Stadien sind dabei keine eigenständigen Einheiten, die immer wieder zyklisch durchlaufen werden. Vielmehr sind zahlreiche Modifikationen dieser denkbar. Dabei können Ziele zu Nebenzielen werden, diese werden evtl. neu formuliert oder sogar im Verlauf eines längeren Handlungsprozesses schlichtweg vergessen (Richter

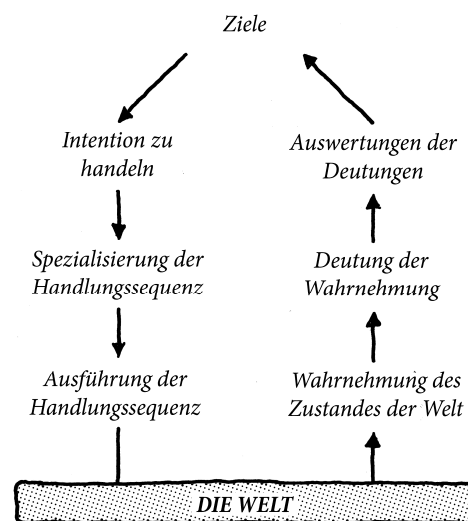


Abbildung 10: Die sieben Stadien des Handelns nach (Norman 1989); Darstellung in Anlehnung an (Richter 2008)

2008). Letztendlich können sich Menschen auch gewohnheitsmäßig oder reaktiv verhalten. Dabei werden im Gegensatz zu oben beschriebenen Szenarien die Handlung bzw. das Verhalten nicht durch vorweg definierte Ziele bestimmt, sondern der Mensch wird nur durch Wahrnehmung und Bewertung der Umweltveränderung zu einem bestimmten Verhalten angetrieben. Dieses reaktive Verhalten wurde bereits weiter oben im Kapitel der Behavior-Settings beschrieben. Aus diesem Grund entwickelte Hacker drei *Bewusstseins*-Ebenen zur Beschreibung des Modells einer hierarchischen Regulation von Handlungen, um die Interaktion von Mensch und Umwelt besser zu charakterisieren (Hacker 2005).

Auf der *ersten Ebene* (oberste Hierarchiestufe) werden sogenannte bewusstseinspflichtige intellektuelle Vorgänge beschrieben. Dabei werden Intentionen und Ziele analysiert, die dann wiederum in Strategien und Ausführungsplänen umgesetzt werden. Die Analyse der Umwelteinflüsse im Verlauf der Handlungszyklen wird dabei immer wieder über einen Soll-Ist-Vergleich vom Handlungsziel und seiner Annäherung abgeglichen.

Auf der *zweiten Ebene* (mittlere Hierarchiestufe) finden die bewusstseinsfähigen Urteilsprozesse statt. Diese Prozesse werden über das individuell vom Menschen erworbenem Wissen über Situations- und Reizmerkmale beurteilt und anschließend klassifiziert. Auf dieser Grundlage kann das Individuum dann die im Gedächtnis gespeicherten Handlungsprozesse wieder abrufen. Dies ermöglicht das zeitnahe Abrufen von kognitiven Bewegungstereotypen bzw. Routinen und ermöglicht hierdurch eine flüssige Abfolge von Teilhandlungssequenzen.

Auf der untersten Hierarchiestufe, der *dritten oder auch sensumotorischen Ebene genannt*, finden die unselbständigen Operationen im Verhalten statt. Diese Verhaltensoperationen sind automatisiert, sie sind angeboren und werden z. B. in Notfallsituationen aktiviert. Man kann sie auch als Bewegungs-Reflexe bezeichnen (Richter 2008). Dies kann beispielhaft eine rasche Fangbewegung aufgrund einer herabfallenden Vase sein.

*

Richter (Richter 2008) hat auch erkannt, dass die Theorie der Handlungsregulationen nicht nur für ein besseres Verständnis für die Beziehung von Mensch und gebauter Umwelt geeignet ist, sondern durchaus auch praktische Relevanz für die Gestaltung dieser gebauten Umwelt hat. Dabei gibt es in unterschiedlichsten Baubereichen Ansätze zu deren Umsetzung. So fand die Theorie z. B. Berücksichtigung bei der Planung von Kraftwerkswarten (Richter und Schmidt 1994). Allgemeine interdisziplinäre Ansätze der Gestaltungswissenschaften zur Handlungsregulationstheorie werden bei Volpert (Volpert 1994) beschrieben. Im Rahmen der Planung und Gestaltung von Verwaltungsbauten und Produktionsstätten bzw. Fabriken finden bei Richter (Richter 1995), Frieling und Sonntag (Frieling und Sonntag 1999) sowie Ulich (Ulich 2005) erste einschlägige Überlegungen und Beispiele ihren Einzug. Im Zusammenhang mit dem Projekt KARMIN

(Kurzei et al. 2016), der baulich-infektionspräventiven Ertüchtigung eines Zweitbettzimmers im Krankenhaus, des InfectControl 2020 Konsortiums, ist die Studie zum Patientenzimmer von Obenhaus und Richter (Obenhaus und Richter 1999) interessant. Diese befasst sich mit der Planung von Zweitbettzimmern unter architekturpsychologischen Gesichtspunkten der Nutzer. Die überschaubare Anzahl der genannten Studien zeigt, dass eine ganzheitliche, systematische Anwendung der Theorie der Handlungsregulationen im Bereich der gebauten Umwelt noch aussteht.

Zusammenfassend kann zu den unterschiedlichen Theorien der Architekturpsychologie festgehalten werden, dass es bis heute keine umfassende Theorie im Bereich der Psychologie gibt, die alle Elemente und Unterschiede der komplexen Mensch-Umwelt-Beziehung bzw. -Interaktion vollends beschreibt. Es gibt schon einige vielversprechende Ansätze, die man zur Zeit als Bausteine eines noch nicht vollendeten Theorie-Gebäudes bezeichnen könnte. Ein besonderer Baustein hierbei ist die Handlungsregulationstheorie aufgrund ihres hohen Praxisbezuges.

*

Aber nicht nur die unterschiedlichen Theorien der Architekturpsychologie können dem Planer bei der baulichen Infektionsprävention wichtige Informationen zum Verständnis über das Zusammenspiel von Mensch und Raum geben, sondern auch andere wichtige Teilerkenntnisse dieser Wissenschaftsdisziplin. So bezeichnet z. B. das **kognitive Kartieren** die Fähigkeit des Menschen Informationen über die räumliche Umwelt aufzunehmen, zu sortieren, zu modifizieren, abzuspeichern und dann wiederum situationsbezogen handlungsorientiert abzurufen. Das auf diese Weise angeeignete räumliche Wissen wird mental von sogenannten *Kognitiven Karten* im Gedächtnis visualisiert. Dabei sind die kognitiven Karten keine eins zu eins Wiedergaben der Realität, sondern vielmehr mental vereinfachte Repräsentationen von mehrdimensionalen komplexen Räumen. Aus diesem Grund werden z. B. amorphe Landschaftsmerkmale wie z. B. Straßen oder Flüsse im Geiste begradigt. Ebenso werden diese Landschaftsmerkmale in klare Nord-Süd oder Ost-West-Ausrichtung eingeordnet. In gleicher Weise neigt der Mensch dazu, sich Kreuzungspunkte wie Straßenkreuzungen oder Wegekrenzungen in Gebäuden rechtwinklig vorzustellen. Im Umkehrschluss heißt dies, dass der Mensch bereits rechtwinklig angelegte Räume, von Stadträumen bis zum Gebäude selbst, noch einfacher kognitiv kartieren kann und somit auch einfacher wieder abrufen kann. Die Orientierung und entsprechende Raumdurchschreitung wäre damit vereinfacht und entsprechend stabilisiert.

Der Frank Lloyd Wright Schüler Kevin A. Lynch trug mit seinem Buch „The Image of the City“ (Lynch 1960) zusammen mit dem Zeitschriftenaufsatz des Psychologen Edward C. Tolman „Cognitive Maps in Rats and Men“ (Tolman 1948) zum Einzug der *Kognitiven Karten* in die Sozialgeografie bei. Der MIT-Professor Lynch war damit internationaler Vordenker im Bereich des Städtebaus bzw. der Stadtplanung. Seine For-

schung über Kognitive Karten fand ebenso Einzug als Teil der Wahrnehmungspsychologie, sowie Wahrnehmungsgeographie, die auch Perzeptionsgeographie genannt wird. Bei der *Art und Weise der Raumdurchschreitung*, die wiederum wichtig für das Verständnis der baulichen Infektionsprävention ist, kann man den Prozess der Wegsuche in fünf Teilvorgänge zerlegen (Richter 2008): Orientierung – Zieldefinition – Routenwahl – Beibehalten des richtigen Weges – Zielentdeckung. Bei nahezu allen Teilschritten spielen die *Kognitiven Karten* eine entscheidende Rolle. Bei der *Orientierung* findet ein Abgleich von Kognitiver Karte und wahrgenommener Umwelt mit Hilfe von Markierungspunkten statt. Bei der *Zieldefinition* muss eine vage Intention in ein konkretes Motiv d. h. auch einen konkreten Ort in der Umwelt mit Hilfe der Kognitiven Karte bestimmt werden. Bei der *Routenwahl* entsteht eine kognitive Verbindung von aktuellem Standort und angestrebtem Ziel. Im vierten Schritt, dem *Beibehalten des richtigen Weges*, wird permanent die Kognitive Karte und die gleichzeitig immer wieder neu wahrgenommene Umwelt mit einander abgeglichen und auf Richtigkeit überprüft. Im entscheidenden Schritt, dem *Entdecken des Zieles*, wird realisiert, dass man dort angekommen ist, wo man ursprünglich hinwollte. Dies wiederum findet nur über den Abgleich der Kognitiven Karte mit der realen Umwelt statt. Um diese oben beschriebenen fünf Teilprozesse (Orientierung, Zieldefinition, Routenwahl, Beibehalten des Weges, Entdecken des Zieles) der Wegfindung bzw. Raumdurchschreitung im Rahmen der Kognitiven Karten zu erleichtern, definiert Lynch fünf Grundelemente (Lynch 1989): Wege – Grenzlinie/Ränder – Bereich – Brennpunkt – Merk- oder Wahrzeichen.

Wege als Strecke, vereinfacht als Vektor von aufeinanderfolgenden Punkten, sind für die meisten Menschen die wichtigsten Elemente im Raum. Die Menschen bewegen sich auf diesen *Wegen* in Form von Straßen, Trassen, öffentlichen Verkehrsmitteln aber auch Wegen in Gebäuden. Die Räume werden dabei als eine wegbegleitende Ansammlung von Gestaltelementen wahrgenommen. Die Wege selbst werden als vorherrschendes Element der Umgebung gewertet.

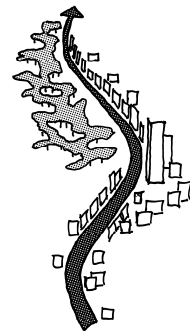


Abbildung 11: Die Wege (in Anlehnung an Lynch 1989)



Abbildung 12: Grenzlinien / Ränder (in Anlehnung an Lynch 1989)

Die **Grenzlinien bzw. Ränder** sind Linearelemente. Sie werden nicht als Wege genutzt. Sie können z. B. Grenzen darstellen zwischen zwei Gebieten, einen Küstenstreifen, eine Eisenbahnstrecke oder eine einfache Wand. Auf der einen Seite sind sie Grenzen des Zusammenhangs unterschiedlicher Bereiche, auf der anderen Seite haben sie als Ränder verbindende Funktion als Säume bzw. Nähte nebeneinanderliegender Gebiete. Obwohl die Grenzlinien und Ränder für die Orientierung des Menschen keinen so hohen Stellenwert haben wie die Wege, so sind sie doch ein sehr wichtiges Gliederungselement bei dem be-

stimmte Bereiche durch Grenzlinien zusammengefasst werden. Als wegbegleitende seitliche Richtmarken sind diese Randelemente wichtige Orientierungshilfen beim Durchschreiten des Raumes.

Die von Lynch bezeichneten **Bereiche** sind mittelgroße bis große Abschnitte der Stadt, die als eigenständige Gebiete wahrgenommen werden. Der Mensch nimmt bewusst wahr, dass er in ein Gebiet hineingeht und es später auch wieder verlässt. Dabei hat jedes dieser Gebiete bzw. Bereiche in der Vorstellung der Nutzer jeweils einen individuellen Charakter. Diese eigene Identität wird von innen thematisch aufgeladen, von

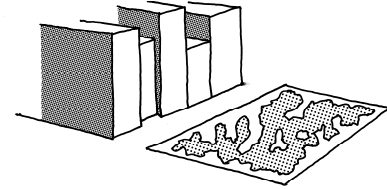


Abbildung 13: Die Bereiche (in Anlehnung an Lynch 1989)

außen wird dieser eigene Charakter als Orientierungselement genutzt. Die individuelle Identität dieser Bereiche / Gebiete wird durch thematische Gestaltelemente geprägt. Diese können sein: Gliederungen, Symbole, Formen, Details, Nutzungsarten, Gebäudetypen, Einwohnerzusammensetzung, Nutzungsarten, Art des Verkehrs, Gebäudezustand, Topografie und vieles mehr. Die Einheitlichkeit dieser Elemente tragen zur Identifikation dieser Bereiche bei.

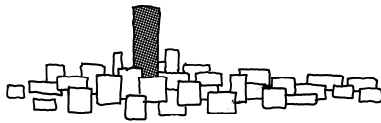


Abbildung 14: Die Brennpunkte (in Anlehnung an Lynch 1989)

Die **Brennpunkte** sind strategische Punkte einer Stadt. Sie sind häufig Ziel- und Anfangspunkt einer Bewegung im (Stadt-) Raum. Diese Zentralpunkte sind öffentlich zugänglich und markieren das Zusammentreffen unterschiedlichster Bewegungstrassen wie Straßen, Fußwege, S- und U-Bahntrassen etc. Diese Brennpunkte werden vom Nutzer besonders bewusst wahrgenommen, da an dieser Stelle meist eine Entscheidung zur Richtungsänderung oder Verkehrsmittelwahl getroffen werden muss. Daher sind bewusst wahrgenommene Entscheidungspunkte bzw. Brennpunkte z. B. U-Bahnstationen oder Umsteigebahnhöfe, die im Gedächtnis kartiert werden.

Das fünfte Orientierungselement sind die **Merk- oder Wahrzeichen**. Sie fungieren als optische Bezugspunkte. Dies können Türme, Tore, Denkmäler sowie alle auffallenden Bauwerke oder Elemente sein, die aus der Masse herausstechen. Allen diesen Merkzeichen ist gemein, dass sie einen deutlichen Kontrast zur Umgebung aufweisen, auch aus der Distanz zu erkennen sind und meist eine klare und einfache Form haben wie z. B. der Eiffelturm oder die Siegessäule. Gestaltpsychologisch wird hierbei vom Prägnanzprinzip gesprochen.

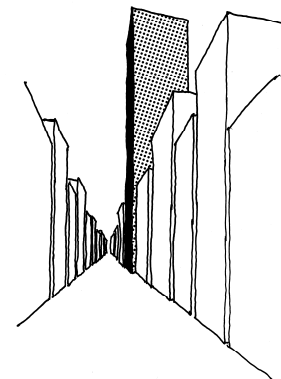


Abbildung 15: Die Merk- oder Wahrzeichen (in Anlehnung an Lynch 1989)

Lynch bezieht seine fünf Grundelemente auf die Größenordnung des Städtebaus. Diese fünf Gestaltungsmerk-

male, die wesentlich zur Orientierung und Raumdurchschreitung auch im Verständnis zur baulichen Infektionsprävention der handelnden Personen dienen, können auch auf die Größenordnung eines Gebäudes bzw. von Gebäudebereichen herunterskaliert werden. Die individuellen Merkmale dieser Elemente finden sich ebenso beim Durchschreiten des Raumes im Gebäude. Beide Male sprechen wir vom gebauten Raum, einmal als städtischem Raum als Außenraum und auf der anderen Seite vom umbauten Raum als Teil und Kontinuum eines Gebäudes. Ebenso verhält es sich mit den physischen Formen zur Ablesbarkeit von Funktionen der Stadt bzw. des gebauten Raumes. Lynch sieht in der Ablesbarkeit der Stadt als gebautem Raum den wichtigsten Einflussfaktor auf das Wohlbefinden und das Orientierungsvermögen der Nutzer (Robert-Koch-Institut 2015; Richter 2008). Die physischen Formen der Ablesbarkeit kann der Entwerfer beeinflussen und hat damit großen Einfluss auf die Orientierung der Nutzer und ihr Verhalten im Raum und damit indirekt auch Einfluss auf die Infektionskette im Hinblick auf die personenbezogene Distanz im Zusammenspiel mit indirekter und direkter Erregerübertragung. Die Eigenschaften der physischen Formen werden bei Lynch (Lynch 1989) folgend definiert:

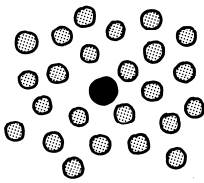


Abbildung 17: Einmaligkeit (in Anlehnung an Lynch 1989)

Die sogenannte Figur-Hintergrund-Schärfe oder auch **Einmaligkeit** genannte Eigenschaft kann durch unterschiedliche Entwurfsentscheidungen erreicht werden. Dies kann z. B. durch Grenzlinienschärfe, d. h. durch abruptes Enden der Bebauung, ebenso durch Umschließungen wie bei einer Platzsituation geschehen. Des Gleichen kann die *Einmaligkeit* durch eine räumliche Anordnung durch den Kontrast von Form, Oberfläche, Vielfalt, Intensität, Dimension oder der Nutzung erreicht werden. Dabei kennzeichnen diese unterschiedlichen Eigenschaften das Element und machen es hierdurch erkennbar und lebendig. Die Einmaligkeit unterstützt hierbei nicht nur die Orientierung der Nutzer, sondern erleichtert den Effekt, dass je mehr Nutzer über die Zeit sich mit ihrer Umgebung vertraut machen, desto weniger müssen sie sich noch an den groben physischen Formen ihrer Umwelt orientieren und können sich somit vermehrt an dem Kontrast und der Einmaligkeit erfreuen.

In seiner Vorstellung kann der Mensch leichter einfache geometrische Formen aufnehmen. Diese einfachen oder klaren Formen können z. B. Rechtecke oder Kuppeln sein. Lynch nennt dies die **Klarheit der Form**. Das Speichern von Formen im Gedächtnis führt dabei zu dem Phänomen, dass der Mensch dabei komplexe räumliche Situationen soweit verzerrt bis dadurch die Form geometrisch wieder vereinfacht ist.

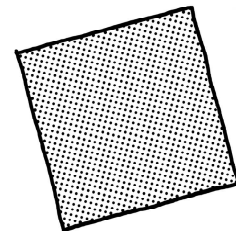


Abbildung 16: Klarheit der Form (in Anlehnung an Lynch 1989)

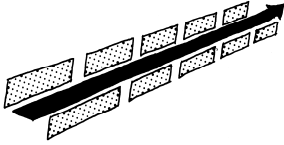


Abbildung 18: Kontinuität (in Anlehnung an Lynch 1989)

Im Entwurfsprozess wird **Kontinuität** durch die Wiederholung von rhythmischen Setzungen bestimmter raumbildender Körper erreicht, wie z. B. von einer Abfolge: Gebäude-Platz-Gebäude-Platz-Gebäude. Auf gleiche Weise wird über die Ähnlichkeit oder Gleichheit von Form, Nutzung sowie Oberfläche eine Kontinuität erzeugt. Diese räumlichen Eigenschaften erleichtern die Wahrnehmung und Orientierung in einer komplexen physischen Realität und verleihen damit einer vielschichtigen Erscheinung eine zusammenfassende eigene Identität.

Die **Dominanz** wird durch die Vorherrschaft eines Teiles über andere erreicht. Dies gelingt durch Intensität, Dimension und auch Interesse. Die Dominanz wird dabei als Hauptteil mit beigeordneten Gruppen empfunden. Ähnlich wie bei der Kontinuität erlaubt diese Eigenschaft die Vereinfachung des komplexen Bildes durch Weglassen oder Unterordnen von Einzelelementen.

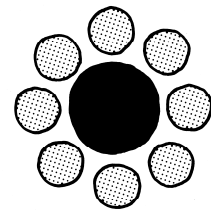


Abbildung 19: Dominanz (in Anlehnung an Lynch 1989)

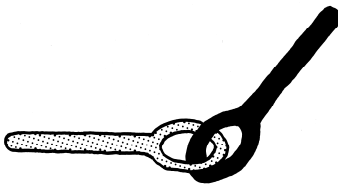


Abbildung 20: Klarheit der Verbindungsglieder (in Anlehnung an Lynch 1989)

Die **Klarheit der Verbindungsglieder** erfolgt durch das Herausarbeiten von Nahtstellen bzw. Verbindungsgelenken wie z. B. bei bedeutenden Straßenkreuzungen oder Küstenlinien. Auf gleiche Weise kann die *Klarheit der Verbindungsglieder* auch über Querverbindungen oder wechselseitige Beziehungen wie z. B. bei einem Gebäude zum umgebenden Gelände oder einer U-Bahnstation zu der darüber liegenden Straße hergestellt werden. Diese Gelenke bzw. Verbindungsglieder sollten besonders gut visuell erfassbar sein, stellen sie doch wichtige strategische Punkte im Gefüge der Raumorientierung dar.

Eine weitere Eigenschaft ist die **Richtungsdifferenzierung**. Sie kann über Asymmetrien, wie z. B. Kurven oder Steigungen, erreicht werden. Dabei werden Wege unterschieden, die wiederum z. B. landeinwärts oder zur Stadt führen, oder unterschiedliche Funktionen voneinander getrennt wie bei einer Häuserlinie zum Stadtparkrand. Die Richtungsdifferenzierung ist als Eigenschaft für das großmaßstäbliche Strukturieren der Bereiche sehr hilfreich.

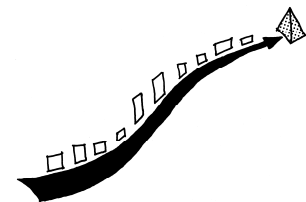


Abbildung 21: Richtungsdifferenzierung (in Anlehnung an Lynch 1989)

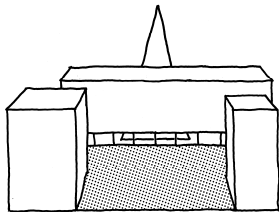


Abbildung 22: Umfang des Sichtbaren (in Anlehnung an Lynch 1989)

Der **Umfang des Sichtbereiches** sind Eigenschaften, die das Blickfeld und die Durchsichttiefe vergrößern. Dies kann tatsächlich oder in symbolischer Weise geschehen. Zu diesen Eigenschaften gehören Aussichten, Durchsichten oder Panoramen, wobei das Blickfeld in die Tiefe verlängert wird, wie z. B. bei breiten offengestalteten Räumen oder Überblickssituationen. Ebenso zählen zu diesen Eigenschaften gliedernde Elemente wie z. B. hervorstehende Objekte oder Blickpunkte, bei denen der Raum visuell definiert

wird. Dabei werden Dinge optisch in das Gesichtsfeld gerückt wie z. B. durch den szenischen Hintergrund einer konkaven Situation eines Bergpanoramas oder einer geschwungenen Wegeführung. Dadurch werden Zeichen und Dinge herausgearbeitet, die an sich nicht als sichtbare Elemente wahrgenommen werden. Diese beschriebenen Eigenschaften erleichtern das Erfassen und Orientieren in vielschichtigen weiträumigen Situationen. Mit dem Herausarbeiten bestimmter Elemente wird sozusagen die Leistungsfähigkeit des Gesichtssinnes vergrößert.

Das **Bewegungsbewusstsein** beschreibt Eigenschaften, die dem Betrachter über seinen Muskel- und Gesichtssinn seine möglichen und tatsächlichen Bewegungen fühlbar erscheinen lassen. Hierbei werden Gestaltungsmittel eingesetzt, um die Klarheit von Kurven, Steigungen oder Wegdurchdringungen zu optimieren. Dies soll wiederum das Erlebnis der Bewegungsperspektive verbessern und für die Gewissheit von Richtung oder Richtungswechsel dienen.



Abbildung 23: Bewegungsbewusstsein (in Anlehnung an Lynch 1989)

Diese Eigenschaften sind von besonderer Bedeutung, da eine Stadt, ein Gebäude oder auch nur ein Raum immer aus der Bewegung heraus wahrgenommen wird. Diese Eigenschaften des Bewegungsbewusstseins werden zur Gliederung und Kennzeichnung genutzt. Aufgrund dieser Eigenschaften können die Nutzer Entfernung und Richtung besser einschätzen und die formale Qualität der eigenen Bewegung besser beurteilen.

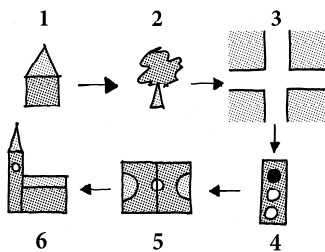


Abbildung 24: Zeitliche Reihenfolge

Bei der **Zeitlichen Reihenfolge** werden bestimmte Elemente z. B. auf einem Weg in einer zeitlichen Abfolge wahrgenommen. Man beschreibt diese auch als *Eins-nach-dem-anderen-Verknüpfung*. Dabei ist jedes Element mit seinem Vorgänger und Nachfolger verbunden, wie z. B. bei einer Abfolge von Merk- oder Wahrzeichen. Die Abfolge wird nicht nur anhand der einzelnen Elemente, sondern auch anhand ihrer zeitlichen Komponente zueinander wahrgenommen.

Diese *Zeitliche Reihenfolge* wird häufig bei vertrauten Wegen empfunden, wobei das Zusammenspiel der zeitlichen Abfolge entlang der Reihenelemente als Einzelaspekt stärker wahrgenommen wird als jedes einzelne Element selbst.

Die Einprägsamkeit eines Elementes kann auch über abstrakte Eigenschaft wie **Namen und Bedeutungen** gesteigert werden. Dabei sind Namen hilfreich zur Identitätsanreicherung. Sie geben dabei manchmal Hinweise auf die Lage, wie z. B. bei der Bezeichnung *Südbahnhof*. Ebenso können diffe-



Abbildung 25: Namen und Bedeutungen

renzierte Benennungssysteme die Einordnung der einzelnen Elemente erleichtern. So können z. B. nebeneinanderliegende Straßen alphabetisch benannt werden. So bilden Assoziationen und Bedeutungen funktioneller, historischer, wirtschaftlicher, individueller oder sozialer Art eine Welt, die außerhalb der äußeren Erscheinung zu finden ist.

Lynch bezieht sich zwar in seinen Ausführungen immer auf den städtischen Raum, aber sind diese Erkenntnisse zu Elementen und Eigenschaften der gebauten Umwelt auch auf das Gebäude herunter zu skalieren und gleichfalls gültig. Die gezeigten fünf Elementen und zehn Eigenschaften nach Lynch (Lynch 1989) dürfen nicht für sich isoliert betrachtet werden. Erst die richtige Kombination und Vielzahl der Elemente und Eigenschaften geben jedem Bereich des gebauten Raumes seine ganz eigene Identität. Diese Identität bestimmt eine präzise Verortung und erleichtert dem Nutzer seine Orientierung im Raum.

Diese Orientierung ist wiederum wichtig, wenn es um eine störungsfreie Raumdurchschreitung bzw. kontaktlose und distanzwahrende Raumnutzung im Sinne der baulichen Infektionsprävention geht.

Nach Lynch Sicht ist dabei wichtig, dass die Planer beim Entwerfen darauf achten müssen, dass sie die gebaute Umwelt so reich wie möglich mit Merkzeichen, Wegen, Grenzlinien, Bereichen und Brennpunkten ausstatten, um alle formalen Eigenschaften zum Ausdruck zu bringen. Auf diese Weise haben die unterschiedlichen Betrachter bzw. Nutzer genügend Material, um die gebaute Umwelt auf ihre ganz individuelle Sichtweise zu erfahren. So kann sich ein Nutzer an Merkzeichen entlang des Weges, ein zweiter an der Oberflächenbeschaffenheit der Straßen und ein dritter an den schwingenden Kurven des Weges orientieren. Auf diese Weise formt sich bei jedem Betrachter ein individuelles Bild, das wiederum übertragbar und auch mitteilbar ist. Das Bild soll eine gewisse Reichhaltigkeit und Stabilität aufweisen. Denn wenn sich auch die räumliche Szene rasch und ständig wechselt, können die beschriebenen Entwurfstechniken helfen, die strukturelle Klarheit und das Gefühl von Kontinuität aufrecht zu erhalten.

*

In der Architekturpsychologie können drei Arten von **Distanzen** ausgemacht werden (Richter 2008). Die Beurteilung dieser Distanzen ist wiederum ein reichhaltiger Wissensschatz für das Verständnis im Umgang von Mensch, Umwelt und Raum in der baulichen Infektionsprävention. Die drei Distanzen werden beschrieben als *Inter-Personelle-Distanz* (IPD), *Inter-Objekt-Distanz* (IOD) und *Person-Objekt-Distanz* (POD). Im

Folgenden werden diese Distanzen inklusive eines Exkurses zu dem Begriff des sogenannten *Crowding* beschrieben.

Der persönliche Raum ist kein geographisch festgelegter Raum. Er ist ortsungebunden und auch nicht durch physische Grenzen definiert. Es handelt sich vielmehr um einen subjektiv empfundenen Raum. Wenn Individuen miteinander agieren wird der persönliche Raum durch die **Inter-Personelle-Distanz (IPD)** definiert. Die Größe der Distanz bzw. der Abstand der handelnden Personen wird über die Qualität der sozialen Interaktion bestimmt. So ist der persönliche Raum also abhängig von den agierenden Personen und der jeweiligen Situation. Wie bereits im Kapitel Architektursoziologie beschrieben, werden die interpersonellen Distanzen in vier Bereiche nach Hall (Hall und Dixon 1976) unterteilt; intime, persönliche, soziale und öffentliche Distanz. Welche Distanz eingenommen wird, hängt von der betreffenden Situation, der jeweiligen Person, der Beziehung zwischen den interagierenden Personen und von den kulturellen Eigenheiten ab (*proxemic phenomenon*).

In Bezug auf die bauliche Infektionsprävention ist im Themenfeld der *Inter-Personellen-Distanz* der Architekturpsychologie die sogenannte **Crowding-Forschung** interessant. Crowding ist dabei ein Sammelbegriff aus der Sozialpsychologie. Dabei geht es um die systematische Erkundung der Auswirkungen hoher räumlicher und sozialer Dichtesituationen wie z. B. in überfüllten Kaufhäusern, bei Demonstrationen oder Straßenfesten, in Fußballstadien oder beengten Wohnverhältnissen. Es gibt eine Vielzahl von unterschiedlichen Crowding-Modellen, die sich heranziehen lassen, um das Entstehen, den Verlauf und das individuelle Erleben von Crowding zu erklären. Bei der Betrachtung der direkten Erregerübertragung der Infektionskette sind die Erkenntnisse solche Crowding-Modelle sehr wertvoll.

Das **Überlastungsmodell** ist ein Erklärungsansatz der Crowding-Forschung bei der die Überlastung der kognitiven Aufmerksamkeits- und Verarbeitungsfähigkeit durch exzessive soziale Stimulation (Stress) dazu führt, dass es zu einer vorübergehenden Erschöpfung und zu selektiver Aufmerksamkeit führt. Eine mögliche Folge kann die Insensibilität gegenüber anderen subtilen sozialen Reizen sein (Cohen 1978). Vereinfacht gesagt, befindet sich eine Person in einer Situation mit hoher Dichte, so wird deren Aufmerksamkeitskapazität reduziert.

Beim sogenannten **Störungsmodell** werden zielgerichtete Verhaltensweisen bewusst gestört, beschränkt, unterbrochen oder blockiert. Dies geschieht aus dem inneren Widerstand, der Reaktanz, gegenüber Einschränkungen der Handlungsfreiheit durch äußeren Druck oder Verbote. Die Reaktanz fördert die Tendenz, gerade das zu tun, was eigentlich unerwünscht oder sogar verboten ist. Räumlich betrachtet beschreibt dieses Störungsmodell das unangenehme subjektive Erleben, wenn bei einer hohen Dichte das Erreichen wichtiger Handlungen oder eigener Ziele durch das Verhalten anderer Personen oder deren bloßer Anwesenheit gestört ist (Schopler und Stockdale 1977).

Das **Privatheitsmodell** beschreibt die Kontrolle der sozialen Abgrenzung und sozialen Interaktion. Dabei wird im jeweiligen Fall ein Niveau an Privatheit angenommen, das für die handelnde Person bezogen auf die Situation optimal ist. Wird dieses optimale Maß überschritten, kommt es zum Crowding, eine Unterschreitung führt zur Isolierung (Altman 1975). Aus diesem Grund wird die Person beim Empfinden eines Ungleichgewichts durch die Veränderung der räumlichen und sozialen Dichte versuchen, wieder ein Optimum zu erreichen. Gelingt dies nicht, wird Stress empfunden.

Das **Überbesetzungs-Modell** oder auch **Overmanning-Modell** beschreibt die Überbesetzung von *Behavior-Settings* bei der durch eine ungenügende Anzahl von Positionen und Rollen (soziale Ressourcen) sowie ungenügende materielle Ressourcen eine Crowding-Situation geschaffen wird (Wicker 1973).

Bei der **Erwartungsverletzungserklärung** wird angenommen, dass sich das Gefühl der Enge immer dann entwickelt, wenn die eigentlich angenommene Dichte bzw. Dichterwartung durch weitere Dichteerhöhung situationsabhängig verletzt wird (Schultz-Gambard 2010). Diese Verletzung normativer Erwartungen wird an soziale aber auch an bauliche Bedingungen einer bestimmten Situation gekoppelt.

Das **Kontrollverlust-Modell** als theoretischer Ansatz von Baron und Rodin (Baron und Rodin 1978) geht davon aus, dass Beengungsstress nur dann entsteht, wenn hohe räumliche und/oder soziale Dichte zum Kontrollverlust eines Individuums führt. Dabei beschreibt das Modell phasenweise den Kontrollverlust durch hohe Dichte beim Erleben der Beengung von der Entstehungsphase über die antizipatorische und verändernde Bewältigungsphase bis hin zur Phase nach der Konfrontation.

*

Die Auswirkungen von Beengungsstress in Crowding-Situationen konnte in mehreren empirischen Studien nachgewiesen werden (Richter 2008). Deren Ergebnisse sind wiederum aufschlussreich im Bereich der interpersonellen Distanz für die bauliche Infektionsprävention. So konnte z. B. in den Studien bei Evans (Evans 1975) und Sundstrom (Sundstrom 1975) nachgewiesen werden, dass hohe soziale Dichte negative affektive Gefühlszustände verursachen können. Darüber hinaus konnte in der Studie von Baum und Paulus (Baum und Paulus 1991) festgestellt werden, dass Übererregung und negative Affekte verstärkt zu Krankheiten führen können. Konkreter wurde noch die britische Langsschnittuntersuchung, die zeigte, dass Beengung und Dichte im Zusammenhang mit endokriner Aktivität und Bluthochdruck steht. Berufspendler in öffentlichen Verkehrsmitteln zeigten Blutdruckwerte und Herzfrequenzmuster wie sie in Stresssituationen bei Kampfpiloten auftreten können (Braun 2005).

Die wechselseitige Beziehung von Beengungserleben bzw. Dichtesituationen und Leistungen beim Lösen von Aufgaben wird in einem weiteren Forschungsfeld untersucht. Ihre Ergebnisse sind zwar heterogen, doch gibt es Hinweise darauf, dass Crowding die Leistungsfähigkeit mindert. Dies vermehrt bei komplexen Aufgaben (Baum und Paulus 1991). Diese Studienergebnisse sind besonders relevant für die Aufgabe der

Orientierung in Crowding-Situationen. Je höher die Dichte desto geringer die Leistungsfähigkeit bei der Orientierung bzw. Raumdurchschreitung auch in der Interaktion bzw. Distanz mit beteiligten Crowding-Personen im Sinne der direkten Infektionsübertragung.

Das Erleben von Crowding-Situationen führt häufig zu zwei Verhaltensweisen der beteiligten Personen. Auf der einen Seite zum Vermeidungsverhalten und auf der anderen Seite zum aggressiven Verhalten. Gerade der Wunsch zum *Vermeiden* von Kontakt ist laut einer Studie von Baum und Valins (Baum und Valins 1977) eher in Situationen anzutreffen, bei denen eine hohe Frequenz von sozialen Kontakten aufgrund einer hohen Dichte von Menschen möglich wäre. Die Studie hat gezeigt, dass die Bewohner von Studentenheimen aufgrund von ungewollten häufigen Interaktionen mit ihren Nachbarn den weiteren Kontakt reduzierten. Ebenso konnte gezeigt werden, dass ähnliches Vermeidungsverhalten z. B. beim Vermeiden von Blickkontakt als Indikator für eine situationsbedingte soziale Interaktion dienen kann. *Aggression* ist die zweite Reaktion auf Dichtesituationen. Besonders in Situationen hoher räumlicher Dichte kommt es zum aggressiven Verhalten unterschiedlicher Stadien (Schultz-Gambard 1990). Beispielfhaft kann hier eine Busfahrt genannt werden bei der aufgrund hoher räumlicher Dichte auch noch die Ressourcen in Form von wenigen freien Sitzplätze weiter verknappt werden. Hier steigert sich das aggressive Verhalten.

Auf gleiche Weise konnten empirische Studien nachweisen, welche baulichen Situationen zu einem Erleben von Beengung bzw. einem erhöhten Dichtegefühl beitragen können (Richter 2008). So wurde in der Studie von Desor (Desor 1972) festgestellt, dass quadratische Räume eine höhere erlebte Beengung gegenüber rechteckigen Räumen zugesprochen wird. Dies wurde von Sadalla und Oxley (Sadalla und Oxley 1984) damit begründet, dass in rechteckigen Räumen die Möglichkeit von größeren Interaktionsdistanzen gewählt werden kann. Dass männliche Versuchspersonen bei geringer Deckenhöhe ein zunehmendes Bedürfnis nach mehr Raum verspüren, wurde in der Studie von Savinar (Savinar 1975) festgestellt. In einer weiteren Studie wurde ermittelt, dass unter freiem Himmel häufig kürzere Interaktionsdistanzen gewählt werden. Dies wurde mit der Kompensation der optischen Weite auf die räumlichen Distanzbedürfnisse der Agierenden begründet (Schultz-Gambard und Hommel 1987).

Auch mit kleineren planerischen Tricks lässt sich die Crowding-Situation entschärfen. So wurde in der Studie von Worchel und Teddlie (Worchel und Teddlie 1976) festgestellt, dass sich das Beengungsgefühl bei hoher sozialer Dichte durch visuelle Ablenkungsmöglichkeiten, wie z. B. Bilder, reduzieren lässt. Ebenso kann Crowding durch ein Höchstmaß an räumlicher Flexibilität reduziert werden. Durch bewegliche und flexible Trennwände oder Decken kann sich die Situation an sich ändernde Dichtebedingungen anpassen (Stokols 1976). Eine weitere Studie hat herausgearbeitet, dass in Crowding-Bereichen klare Orientierungshinweise notwendig sind (Mackintosh et al. 1975). Dabei sollte es aber keine Überladung von Hinweisschildern, sondern nur eine geringe Anzahl von Verzweigungspunkten und Wahlmöglichkeiten geben.

Auch Wener und Kaminoff (Wener und Kaminoff 1983) zeigen den Zusammenhang von dem Erleben von Beengung und Orientierungsmöglichkeiten auf. Dabei wird argumentiert, dass unsere Wahrnehmung handlungsrelevanter Informationen, dies können z. B. Hinweisschilder sein, durch eine hohe soziale Dichte erschwert werden. Dies führt wiederum dazu, dass ursprünglich großzügig geplante Raumsituationen verwirrend und unübersichtlich erscheinen, was wiederum zu einem Beengungsgefühl führt. In einer anderen Untersuchung wurde ermittelt, dass das Beengungsgefühl vermindert werden konnte, indem die Reize, die vermeintlich auf das Crowding hindeuteten, reduziert wurden (Rapoport 1975). Dabei wurde festgestellt, dass das Gefühl von Crowding eher bei höheren Häusern vermittelt wurde. Auf der anderen Seite reduzierte die Verfügbarkeit von Nichtwohnbereichen wie Geschäften, Gaststätten und Parks in Nachbarschaft zu Wohnzonen das Beengungserleben.

Interventionsstudien zeigen am deutlichsten die Rolle von Erkenntnissen aus psychologischer Forschung für das praktische Entwerfen und Realisieren von Bauwerken. Stellvertretend soll hier kurz auf die Studie von Baum und Valins (Baum und Valins 1977) eingegangen werden. Dabei wurden das Erleben und Verhalten von Studenten unter verschiedenen Crowding-Situationen untersucht. Bei den Settings wurden zwei unterschiedliche Wohnheimdesigns verwendet. Das Appartement-Design zeichnete sich durch drei Studentenzimmer aus, die sich jeweils ein Bad und einen gemeinsamen Wohnbereich teilten. Das sogenannte Korridor-Design bestand aus 34 nebeneinanderliegenden Einzelzimmern. Die Wohndichte war bei beiden Designs die gleiche.

Im Ergebnis gaben die Korridor- bzw. Flurbewohner an, dass sie ein größeres Beengungsgefühl aufgrund von häufigen unerwünschten sozialen Interaktionen haben. Sie äußerten gegenüber den Appartementbewohnern den größeren Wunsch, andere Mitbewohner zu meiden (Schultz-Gambard und Hommel 1987). Insgesamt zeigten sie weniger Engagement zur Aufnahme sozialer Kontakte als die Appartementbewohner. Ihr Verhalten wurde als Kompensation des Zuviels an sozialer Dichte mit Rückzug zu begegnen. Die Anzahl an ungewollten sozialen Interaktionen kann durch das Teilen eines langen Flurs in zwei kürzere Abschnitte mittels einer neu eingebrachten Tür deutlich vermindert werden. Die Studie von Baum und Davis (Baum und Davis 1980) zeigte die Reduktion von negativen Ergebnissen aufgrund der architektonischen Intervention der Tür.

Abschließend kann festgehalten werden, dass dem Planer zur Entschärfung von Crowding-Situationen aufgrund der gezeigten Studien eine Reihe von planerischen Möglichkeiten mithilfe dieses Hintergrundwissen zur Seite gestellt werden können.

*

Um wieder zurück auf die drei Arten der räumlichen Distanz im Sinne der Architekturpsychologie zurückzukommen, soll nun die zweite sogenannte **Inter-Objekt-Distanz** (IOD) beschrieben werden (Richter 2008). Diese Distanz beschreibt den Abstand zwischen gebauten Objekten. Dieser Abstand wird auch als **Zwischenraum** bezeichnet. Für

die bauliche Infektionsprävention ist diese Distanz ebenso von Wichtigkeit, da sie auch das Verhalten von Mensch und Raum beeinflusst.

So wird Raum zunächst durch raumbildende Elemente definiert. Diese Elemente können Grenzen wie Kanten und Linien, Grundflächen wie Oberflächen oder Objekte wie Spitzen oder Punkte sein (Meiss 2014). Dazwischen spannt sich der Zwischenraum auf, als freier Raum zwischen zwei Dingen. Diesem Raum wird in der Architekturpsychologie eine besondere Qualität zugesprochen. Er schafft gegenüber dem persönlichen oder öffentlichen Raum die Harmonisierung von Mensch und Bauwerk, Mensch und Freiraum sowie Bauwerk und Freiraum. Diese Qualität des verbindenden Zwischenraumes trägt maßgeblich zur Interaktion von gebauter Umwelt und dem Menschen bei. Die Inter-Objekt-Distanz spannt einen Zwischenraum auf, in dem erst die Interaktion von Mensch und Raum aber auch Mensch und Mensch stattfinden kann. Im Rahmen der Wahrnehmungspsychologie gibt es hierzu viele Beispiele. Die Konturillusion des Dreiecks von Gaetano Kanizsa (Kanizsa 1979) (Abbildung 26) zeigt z. B. den Effekt, dass unser Gehirn im Zuge visueller Vervollständigung etwas Neues entstehen lässt. Im Bild werden nur Konturen angedeutet, vollständige physikalische Kanten des Dreiecks gibt es nicht, dennoch wird ein dreieckiger Platz gesehen. Nicht nur hier im Bild der Konturillusion funktioniert dieser Effekt, er hat ebenso entscheidende Konsequenzen für die Wahrnehmung von dreidimensionalen Räumen.

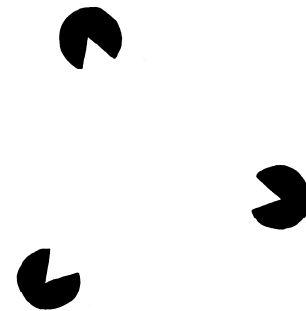


Abbildung 26: Dreieck von Gaetano Kanizsa

In die gebaute Umwelt übertragen bedeutet dies, dass sobald sich Kanten, Konturen und Objekte so zueinander positioniert sind, dass sie wechselseitig miteinander in Beziehung treten können, dann bringen sie etwas Neues hervor, eine Figur oder im gebauten Kontext z. B. einen Platz. Bezogen auf die bauliche Infektionsprävention geben uns die Erkenntnisse der Inter-Objekt-Distanz den Rahmen bzw. das Spielfeld in dem die direkten und indirekten Kontakte der Infektionskette stattfinden können. Aufgrund ihrer wahrnehmungspsychologisch begründeten aufspannenden Zwischenraumwirkung kann sich der Nutzer in optimierten interobjektdistanz-geplanten Gebäuden besser orientieren und so seine infektionsprophylaktische stringente Raumdurchschreitung vollziehen.

Die **Person-Objekt-Distanz** (POD) wird bestimmt durch den Abstand einer Person zum Bauwerk. Architektur im Allgemeinen, vom Gestaltungskonzept im städtebaulichen Maßstab über das Gebäude bis hin zum einzelnen Raum üben einen Einfluss auf ihre Umwelt und damit letztendlich auch auf den Menschen aus. Die Architekturpsychologie geht dabei von der Annahme aus, dass Objekte und damit auch die Architektur unsichtbare Kraftfelder aufbauen, die den Nutzer in seinem Verhalten im Raum beeinflussen (Richter 2008). Diesem Themenfeld widmet sich die Forschungsarbeit von Kim

und Branzell (Kim und Branzell 1995). Sie fokussieren sich bei ihrer Arbeit auf den Zwischenraum zwischen Objekten bzw. Elementen der Architektur und dem Menschen, untersuchten aber auch die zuvor beschriebene Inter-Objekt-Distanz (IOD).

Die Ergebnisse ihrer Studien bzw. Experimente (Kim und Branzell 1995) scheinen zu bestätigen, dass der Raum zwischen Objekten bzw. Elementen der Architektur und der Raum um Objekte herum als eine Art Kraftfeld bzw. als eine Region mit zunehmender Spannung und Dichte verstanden werden kann. Diese von Objekten aufgeladenen wahrnehmbaren Felder von Kräften sind vergleichbar mit denen von Menschen, die ein sogenanntes Kraftfeld in ihren zwischenmenschlichen Interaktionen um sich herum aufbauen. In beiden Fällen beeinflussen diese Kraftfelder, wie Menschen Objekte im Raum organisieren und sich selber als Mensch im Verhältnis zu Objekten platzieren bzw. positionieren. In den Experimenten von Kim und Branzell konnte gezeigt werden, dass die Stärke und Größe des angenommenen Feldes in Wechselbeziehung zu den Merkmalen Form, Größe und Organisation der Objekte variieren.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass das Untersuchen und Gestalten von Zwischenräumen bzw. Distanzen, ob nun zwischen Objekten (IOD) oder zwischen Menschen und Objekten (POD) und, für die bauliche Infektionsprävention am interessantesten, die interpersonelle Distanz (IPD), auf unterschiedlichsten Ebenen von großer Relevanz sind (s. Tabelle 6: Zusammenspiel Infektionskette und Baukomponenten). Die einzelnen Wirkmechanismen der betrachteten Distanzen werden sukzessive transparenter, benötigen aber stetiger weiterer Untersuchungen. Richter (Richter 2008) regt in seinem Standardwerk zur Architekturpsychologie daher an, dass es auch zukünftig weitere verbindende Bereiche der Psychologie und Architektur geben kann, wie sie bereits im Buchtitel von Steven Johnson (Johnson 2002) angedeutet werden: "Emergence – The Connected Live of Ants, Brains, Cities and Software". Diese integrative systemtheoretische Sichtweise, wobei man hierbei *Cities* durchaus mit gebauter Umwelt gleichsetzen kann, steht prototypisch für den modernen interdisziplinären Ansatz, wie er auch von der vorgelegten Arbeit verfolgt wird.

3.3.4 Dynamik Mensch Modellierung

Ein schlagkräftiges Werkzeug zum Verständnis des Zusammenspiels von Mensch, Raum, Distanz und Bewegung ist die **Personenstromsimulation**. Hierbei wird der fußläufige Bewegungsablauf auf der Grundlage von mathematischen Modellen am Computer simuliert. Ursprünglich wurden solche Simulationen zur Berechnung von Evakuierungsmaßnahmen von z. B. Großveranstaltungen eingesetzt. Mittlerweile werden diese Berechnungen aber auch für das Besuchermanagement von z. B. Einkaufs- oder Vergnügungsparks auch aus kommerzieller Sicht angestellt. Darüber hinaus wäre die Möglichkeit zu untersuchen, mithilfe dieser Simulationen z. B. in Interventionsstudien bauliche Maßnahmen zu entwickeln, die die Nutzer hin zu **infektionsprophylaktischen**

Bewegungsmustern (z. B. größere Inter-Personelle- und Person-Objekt-Distanzen) leiten.

Bei der Simulation von Personenströmen können folgende Kategorien klassifiziert werden. Zunächst einmal muss unterschieden werden, ob die Simulation makroskopisch oder mikroskopisch angelegt werden soll. Die **makroskopischen Modelle** bilden übergeordnete und zusammengefasste Parameter von Menschenmengen in Bewegung ab. Typisch hierfür sind Netzwerkflussmodelle. Dem gegenüber bilden die **mikroskopischen Modelle** die individuellen Entscheidungen des Einzelnen mit ab. Sie beziehen auch die Interaktion der einzelnen Menschen untereinander mit ein. Die mikroskopischen Modelle können wiederum je nach Komplexität und Informationsgenauigkeit in diskret und kontinuierlich unterschieden werden. Die **diskreten Modelle** sind entweder räumlich oder zeitlich in berechenbare Abschnitte unterteilt. Diese Unterteilung bestimmt die Genauigkeit bzw. Granularität des Modells. Die **kontinuierlichen Modelle** bilden den Raum und die Zeit stetig ab. Diese hohe Genauigkeit ist meist sehr rechenintensiv. Eine weitere Unterscheidung stellen die regelbasierten oder agentenbasierten Modelle dar. Bei den **regelbasierten Modellen** bekommt jeder simulierte Fußgänger das gleiche globale Regelset, d. h., dass alle die gleichen Eigenschaften besitzen. Hat jeder Fußgänger persönliche Eigenschaften und ein individuellen Handlungsplan, so spricht man von **agentenbasierten Modellen**, da die einzelnen Individuen Agenten genannt werden. Die entsprechenden Modelle nennt man daher auch **Multi-Agenten-Systeme**.

Es gibt zwei grundlegend unterschiedliche Ansätze zur Modellierung der Bewegung von Personen. Bei beiden Ansätzen wird davon ausgegangen, dass Personen nicht nur physikalischen, sondern auch sogenannten „sozialen“ Kräften unterliegen. Dabei verspürt die sich bewegende Person eine Anziehungskraft ausgehend vom Ziel und auf der anderen Seite Abstoßungskräfte von anderen Individuen oder Hindernissen auf dem Weg zum Ziel. Bei dem **potentialbasierten Modell** werden diese genannten Kräfte in ein Potentialfeld überführt. Die Personen laufen entlang des Gradienten dieses Feldes. Das Minimum des Potentialfeldes liegt dabei im Ziel des Weges. Beim **differentialgleichungsbasierten Modell** werden die einzelnen Kräfte in Kraftfelder übertragen. Entlang dieser Kraftfelder, meist dargestellt über den Weg einwirkende Vektoren, läuft der Fußgänger zum Ziel.

*

Auf der Betrachtungsebene einer gesamten Stadt hat König die Wechselwirkungen zwischen baulichen Strukturen und sozialräumlicher Organisation städtischer Gesellschaften simuliert und visualisiert (König 2010). Als Untersuchungsmethoden dienen dabei Simulationen mit Multi-Agenten-Systemen und zellulären Automaten. Die Stadt ist dabei im Sinne der Komplexitätstheorie, die dabei gleichbedeutend für die Theorie komplexer Systeme verwendet wird, ein Musterbeispiel für ein komplexes System mit ihrer **Dynamik der räumlichen Prozesse** (Franck und Wegener 2002). Ausgangspunkt in

der Betrachtung der Raumplanung bei Königs Arbeit ist dabei der Übergang vom Denken in Zuständen hin zum Denken in Prozessen. Nicht mehr die Gegenüberstellung des momentanen Ist-Zustandes und eines künftigen Soll-Zustandes beschreiben die räumliche Planung, sondern die gleichwertige Betrachtung des räumlichen und zeitlichen Bezuges und damit der Prozesse bestimmen die Planung. Dieses Umdenken von Zuständen zu Prozessen ist jedoch komplexer als zunächst erwartet. Die zusätzliche Komponente der Einbeziehung der zeitlichen Dimension multipliziert die Zustände, die betrachtet werden sollen. Dadurch werden sie zu Prozessen. Leider explodiert durch diese Multiplikation die Komplexität der Beschreibung nahezu. Dies ist dahingehend kontraproduktiv, da Menschen die Wirklichkeit nur im Rahmen ihrer kognitiven Möglichkeiten erfassen können. Der Mensch kann nur als Planer funktionieren, wenn er die hochkomplexe Wirklichkeit durch entsprechende Modelle abstrahiert, welche er auch intellektuell verstehen kann. Aus diesem Grund wird oftmals postuliert, dass man entweder einfache oder gar keine brauchbaren Simulationsmodelle hat. Diesem Dilemma, wie bei so einem komplexen System einer Stadt, stellt man sich am besten, wenn man Teilaspekte herausarbeitet, die durch eine Simulation selbstorganisierter Prozesse noch zu bewältigen sind. Bei der Betrachtung der Stadt wären dies z. B. Verkehr- und Erschließungssysteme, residentielle Segregation oder das Wachstum urbaner Strukturen. Natürlich wirken diese Prozesse in Wirklichkeit immer im Zusammenhang untereinander, aber die vereinfachte Einzelbetrachtung soll Grundzüge des Ganzen sichtbar machen. König gelingt es durch einfache Modelle mit zellulären Automaten, auch unter Inkaufnahme einiger Vergrößerung komplexer Muster, diese Teilprozesse nachvollziehbar und sichtbar zu machen. Bei dieser Methodik geht es nicht darum, eine detailgetreue Reproduktion des beobachteten Verhaltens bzw. der Bewegungen der Menschen zu erhalten, sondern dass die komplexen Muster verständlich bzw. intellektuell nachvollziehbar werden. Diese dynamische Analyse in der räumlichen Planung gilt es für die bauliche Infektionsprävention zu nutzen.

*

Für das Verständnis möglicher baulichen Infektionspräventionsstrategien im Bereich der bereits beschriebenen Inter-Personellen- bzw. Person-Objekt-Distanz sind die neuen physikalischen Modellierungskonzepte wie z. B. die Beschreibung bzw. **Simulation der Selbstorganisationsphänomene in Fußgängermengen** von Helbing erkenntnisbringend (Helbing 2013). Die Selbstorganisationsprozesse sind nicht durch Schilder, Vorschriften oder Konventionen geregelt, sondern entstehen durch die Wechselwirkungen der Fußgänger im Rahmen ihrer umbauten Umgebung. Die entsprechenden Simulationsprogramme erlauben eine realistische Nachbildung der Dynamik von Fußgängermengen. Dabei lassen die Modelle eine Berechnung von Bewertungsmaßen wie z. B. die Effizienz einer bestimmten Fußgängeranlage bzw. Situation zu. Die hierbei ermittelten Verbesserungen der Funktionalität können dann wiederum die Planung der

Umgebung optimieren. Helbing trägt die für die Simulation im Bereich Dynamik Mensch-Raum-Zeit notwendigen empirischen Fakten wie folgt zusammen.

Bei der **Routenwahl und Orientierung** wählt der Fußgänger normalerweise die kürzeste Route zum nächsten Ziel. Dabei orientiert er sich an markanten, visuell auffälligen Punkten (Schenk 1998). Sind keine vorgegebenen Wege vorhanden, so entstehen sogenannte Trampelpfade bzw. Ideallinien. Ebenso bewegen sich Menschen mit einer situations- und altersbedingten **Geschwindigkeit**. Diese ist „gauß“-verteilt und liegt im Mittel bei 1,34 m/s, das sind 4,83 km/h. Über die **Geschwindigkeits-Dichte-Relation** kann beschrieben werden, wie die mittlere Geschwindigkeit durch Behinderungen mit zunehmender Personendichte abnimmt und bei einer maximalen Dichte von 5,4 P/m² (Personen pro Quadratmeter) völlig zum Stillstand kommt (Weidmann 1993). Menschen halten beim Gehen bestimmte **Abstände bzw. Distanzen** zu Wänden oder anderweitigen Begrenzungen ein.

Der Abstand wird dabei häufig durch die Beschaffenheit der Begrenzungen bestimmt. In Korridoren z. B. nähert sich der Fußgänger einer Betonwand bis zu einem Abstand von 25 cm, einer Metallwand bis zu 20 cm. Auf Gehwegen gegenüber Hauswänden hält der Fußgänger einen Abstand von 45 cm, gegenüber Fahrbahnen und Gartenzäunen jeweils 35 cm. Mit einem zusätzlichen Platzbedarf ist in Kurven zu rechnen, dieser beträgt 15 cm. Bei kleinerer Geschwindigkeit aufgrund höherer Dichte werden die Abstände geringer, d. h. es wird eine **dichteabhängige Distanz** gehalten. Am deutlichsten wird diese Bewegungsabhängigkeit der Dichte bzw. Distanz aufgrund der Personengeschwindigkeit mit dem sogenannten **Tanzflächenphänomen** beschrieben (Helbing 1992). Während die Tänzer viel Raum beanspruchen, stehen die Zuschauer dicht gedrängt um die Tanzfläche herum.

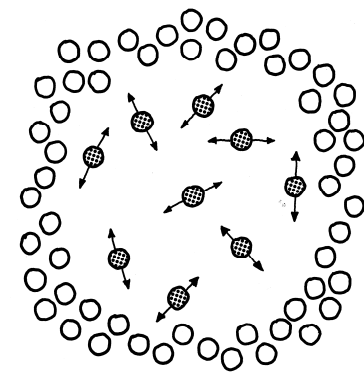


Abbildung 27: Das Tanzflächenphänomen (in Anlehnung an Helbing 1992)

In Aufenthaltsbereichen wie etwa in Foyers, Wartezonen, Bahnsteigen, Restaurants etc. verteilen sich Menschen mehr oder weniger gleichverteilt (Schefflen und Ashcraft 1976). Erst durch sogenannte **Attraktoren** wie z. B. Fensterplätze oder Ausrichtung zu Wasserflächen gibt es Abweichungen zur Gleichverteilung, dort herrscht größere Dichte und somit kürzere Distanzen. Personengruppen bilden hierbei eine Ausnahme. Die eingehaltene Distanz zueinander in einer Gruppe ist immer kleiner als der Abstand zu einer gruppenfremden Person, unabhängig von der umgebenden Personendichte. Ebenfalls empirisch belegt ist, dass sich entgegengesetzte **Fußgängerströme in Bahnen gleicher Gehrichtung** ausbilden. Der Effizienzverlust der Bewegungen beträgt durch diesen Effekt bei gleich starkem Gegenverkehr nur 4 %. Bei fußläufigen Bewegungen bilden sich die Bahnen meistens auf der rechten Seite aus, sogar in Großbritannien trotz Straßenlinksverkehr (Older 1968). Fußgängermengen weisen bei mittleren

oder hohen Dichten und damit kurzen Distanzen Ähnlichkeiten bzw. **Analogien mit Flüssigkeiten und Gasen** auf. So kann man z. B. Fußspuren um Hindernisse herum mit Stromlinien in Flüssigkeiten vergleichen (Grimsehl et al. 1985) oder an den Grenzlinien zwischen zwei entgegengesetzten fußläufigen Menschenströmen fingerartige Ausstülpungen erkennen (Kadanoff 1985; Stanley und Ostrowsky 1985).

Aufbauend auf diesen empirischen Fakten haben sich eine ganze Anzahl von unterschiedlichen Modellierungsansätzen herausgebildet. Die sogenannten **Regressionsmodelle** können die Leistungsfähigkeit in Abhängigkeit von der Dichte einer bestimmten Fußgängeranlage, wie Treppen, Korridore etc. in z. B. Flughafenanlagen (Davis und Braaksma 1988), Gehwegen und Kreuzungen (Oeding 1963; Kirsch 1964; Schubert 1967) oder ganzen Gebäuden (Pauls 1984; Predtečenskij und Milinski 1971) berechnen.

Abläufe zu Evakuierungsmaßnahmen werden häufig durch **Warteschlangenmodelle** simuliert, da hierbei der Faktor Zeit der Gebäuderäumung von entscheidender Natur ist. Die Gebäude werden dabei als ein Netzwerk von Räumen generiert, der einzelne Raum ist hierbei der Knoten und die Türen bzw. Verbindungswege sind die Verbindungslinien. Die Übergangsraten bei einer Evakuierung von einem Raum zum nächsten hängen dabei von den Kapazitäten der Verbindungswege ab. Darüber wird die Verweildauer der Personen in den Räumen bestimmt. Die Änderung der Personenzahlen in den jeweiligen Räumen wird durch Ratengleichungsmodelle wie z. B. *Markov-Modelle* beschrieben (Ashford et al. 1976; Løvås 1994). Kommt es zu besonderen Ereignissen während der Evakuierung, wie etwa Unpassierbarkeit von bestimmten Wegen oder Räumen aufgrund von Einsturz oder Feuer, so kann dies in den entsprechenden Modellen mit abgebildet und die entsprechenden Verweildauern und Personenströme berechnet werden.

Die sogenannten **Routenwahl-Modelle** simulieren die Häufigkeitsverteilung der gewählten Ziele von Fußgängern und beschreiben gleichzeitig die Wegstrecke dorthin (Borgers und Timmermans 1986a; Borgers und Timmermans 1986b; Helbing 1996; Timmermans et al. 1992). Dabei beruhen diese Modelle häufig auf Varianten des *Multi-Logit-Modells* und dienen zur Ermittlung der Akzeptanz von bestimmten Zielen wie z. B. Geschäften sowie der Belastung von Wegen (Domencich und MacFadden 1975; Dios Ortúzar und Willumsen 1990). Entsprechende Größen wie Warenangebot der Geschäfte, ihre Lage oder

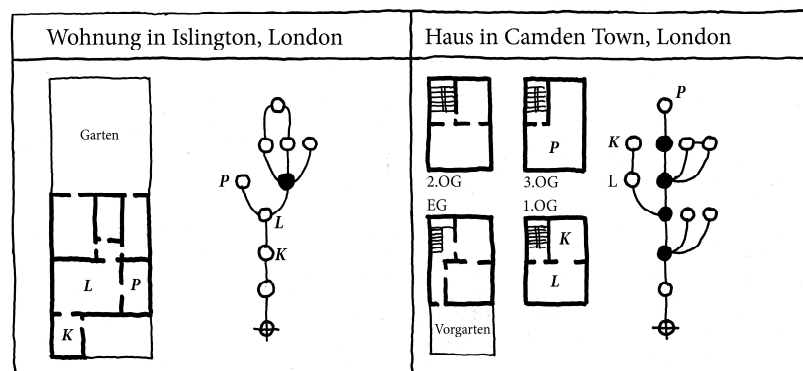


Abbildung 28: Übertrag eines Gebäudegrundrisses in eine netzwerk-graphenbasierte Darstellung (in Anlehnung an Hillier und Hanson 1984)

Preisniveau aber auch die Entfernung zu Parkplätzen oder öffentlichen Verkehrsmitteln fließen in die Modelle mit ein.

Aufgrund der hohen Komplexität des Fußgängerverhaltens sind makroskopische Modelle zur realitätsnahen individuellen Simulation kaum noch darstellbar. Helbing entscheidet sich daher zur Simulation einzelner Fußgänger für mikroskopische Modelle mit überschaubaren Fußgängerzahlen (Helbing 2013). Dabei werden die individuellen Unterschiede wie z. B. Ziel oder Wunschgeschwindigkeit berücksichtigt. Dieses detaillierte Mikrosimulationsmodell nennt er selbst das **soziale Kräftemodell**. Ähnliche Ansätze verfolgen das Modell von Gipps` und Marksjs (Gipps und Marksjö 1985), welches als einfacher Vorläufer des Kräftemodells bezeichnet werden kann, sowie das Modell von Ebihara und Kollegen (Ebihara et al. 1992). Ausgangspunkt des Modells ist die Annahme, dass Verhaltensänderungen, in diesem Sinne auch die individuelle Fortbewegung, durch äußere *soziale Kräfte* beschrieben werden können. Helbings soziales Kräftemodell kann man daher als **mathematische Spezifikation von Lewins sozialer Feldtheorie**, die bereits im Kapitel Architekturpsychologie beschrieben wurde, verstehen (Helbing 1993, 1994, 1995). Mit diesem Modell kann besonders gut das Verhalten im Fußgängerverkehr beschrieben werden (Helbing 1990, 1991; Helbing und Molnár 1995; Molnár 1995). Bei dem **sozialen Kräftemodell** ist zu berücksichtigen, dass sich *soziale Kräfte* durch einige wesentliche Unterschiede zu *physikalischen Kräften* auszeichnen. Wesentlichster Unterschied ist hierbei, dass eine soziale Kraft nicht auf Energie- oder Impulsaustausch bzw. Kraft erzeugt Gegenkraft beruht, sondern auf einem meist nonverbalen Informationsaustausch aufbaut, der eine Verhaltensänderung über Umwege mithilfe von mentalen und psychischen Prozessen nur indirekt bewirkt. Der individuelle Fußgänger kann als *aktives* System bezeichnet werden, der seine Verhaltensänderungen selber generiert. Dabei wird die soziale Kraft nicht direkt von der Umwelt auf das Individuum ausgeübt, sondern ist vielmehr eine Größe, die eine konkrete *Handlungsmotivation* beschreibt.

Diese Motivation bewirkt eine physische Handlung in Form einer Reaktion auf die Information über seine individuell wahrgenommene Umwelt. Dabei bewirkt die soziale Kraft in Bezug auf die Fußgängerbewegung eine Richtungsänderung, ein Abbremsen oder Beschleunigen. In all diesen Phasen werden die entsprechenden Distanzen (Person-Objekt bzw. Inter-Personell) verändert. Das soziale Kräftemodell kann auch in Zusammenhang mit sozialpsychologischen **Motivationstheorien** (Atkinson 1964) und **Konflikttheorien** (Herkner 1975; Miller 1944) betrachtet werden. Dabei wird das Verhalten in Situationen beschrieben, bei denen gleichzeitig attraktive wie auch repulsive Zielreize vorhanden sind, die entsprechende Konflikte aufgrund von widersprüchlichen Motivationen auslösen.

Dennoch bleibt auch beim sozialen Kräftemodell die Bewegung des einzelnen Fußgängers nicht exakt voraussagbar. Überträgt man es wieder zur Beschreibung von Fußgängermengen, mittelt sich der Effekt der individuellen Abweichung wieder heraus. Bei dieser Betrachtung ist nicht entscheidend, wer genau im Einzelnen bei der Simulation

als nächstes ein Ausweichmanöver oder eine Abbiegung nimmt, es genügt zu wissen, wieviel Prozent dieser Gruppe es tun werden. Aus diesem Grund erlaubt das Modell sehr zuverlässige Computersimulationen von Menschen in Bewegung. Helbing und Kollegen haben mit diesem Modell unterschiedliche räumliche Situationen aufgesetzt und mit numerischen Studien das Verhalten interagierender Fußgänger simuliert.

Das Modell gibt trotz seiner Einfachheit mit automatischen Verhaltensreaktionen viele beobachtete Phänomene nahezu realistisch wieder. Diese Beobachtungen werden als **Selbstorganisation kollektiver raum-zeitlicher Bewegungsmuster** beschrieben (Helbing 2013). Die Selbstorganisation resultiert aus den Wechselwirkungen der Fußgänger untereinander, ohne dass diese Mitwirkung an kollektiven Verhaltensstrukturen von den Beteiligten bewusst wahrgenommen wird.

Exemplarisch sollen hier nur drei Phänomene kurz beschrieben werden, die mithilfe von Mikrosimulationsstudien des sozialen Kräftemodells validiert werden konnten. Ihre Erkenntnisse haben auch immer direkten Einfluss auf die Parameter der Inter-Personellen- und Person-Objekt-Distanz auch im Sinne einer baulichen Infektionspräventionsstrategie. So konnte z. B. die empirisch beobachtete **Bildung von Bahnen** bei Fußgängern gleicher Gehrichtung durch die Simulation des sozialen Kräftemodells oberhalb einer kritischen Menschendichte reproduziert werden. Die Anzahl der Bahnen bzw. dynamisch variierenden Spuren hängt von der Breite des Weges bzw. Flures und der Fußgängerdichte ab. So bleiben oft nur zwei entgegengesetzt laufende Spuren bei großen Dichten übrig.

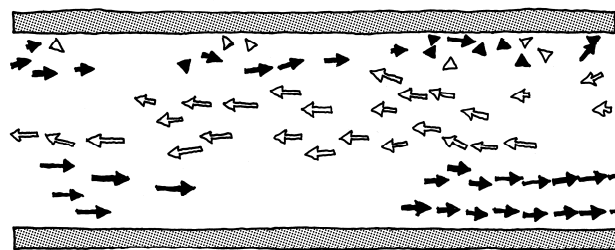


Abbildung 29: Ausbildung von Bahnen bei entgegengesetzten Laufrichtungen (in Anlehnung an Molnar 1995; Helbing und Molnar 1997)

Ebenfalls konnten das Phänomen der empirisch belegten **Oszillationen der Durchgangsrichtung** an engen Stellen wie z. B. Türen mit dem Modell simuliert und verständlich hergeleitet werden. Dabei stauen sich Fußgängergruppen auf beiden Seiten eines schmalen Durchgangs auf. Zunächst gelangt ein ganzer Pulk von einer Seite durch die Öffnung bis der Fluss durch den Druck der gegenüberliegenden Seite gestoppt wird. Dadurch kommt es zunächst zum Stillstand und die andere Seite kommt zum Zug. So lange neue Fußgänger eintreffen wiederholt sich dieser Vorgang, was als Oszillieren bezeichnet wird. Die nebenstehende Abbildung zeigt, dass sich die jeweils in Bewegung befindlichen Fußgängerpulk einen fluss-ähnlichen Weg durch die entgegengesetzte bzw. wartende Gruppe bahnen.

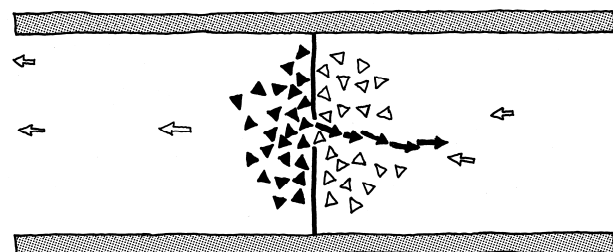


Abbildung 30: Oszillieren der Durchgangsrichtung (in Anlehnung an Molnar 1995; Helbing und Molnar 1997)

An Fußgängerkreuzungen bzw. der Kreuzung von zwei Korridoren in Gebäuden können sich sehr unterschiedliche Bewegungsmuster ausbilden. Diese **Dynamik an Wege-Kreuzungen** treten temporär in Phasen senkrechter und waagerechter Durchquerung auf. Abgelöst werden diese linearen Bewegungen durch einen zeitweiligen Kreisverkehr mit variierender Rotationsrichtung. Diese raum-zeitlichen Bewegungsstrukturen führen zwar zu kleinen Umwegen und kurzen Wartezeiten, reduzieren jedoch das Chaos auf der Kreuzung, wodurch weniger Brems- und Ausweichmanöver nötig werden. Hierdurch wird die Effizienz des Fußgängerflusses gesteigert.

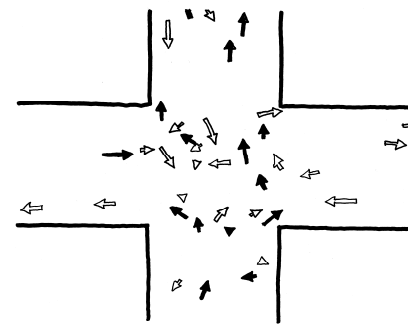


Abbildung 31: Dynamik an Wege-Kreuzungen (in Anlehnung an Molnár 1995; Helbing und Molnár 1997)

Für den Bereich der baulichen Infektionsprävention stellt die Möglichkeit der Simulation mithilfe des sozialen Kräftemodells eine sehr wertvolle Methode dar, bereits zum Zeitpunkt der Gebäude-Planung auf dem Computer Optimierungen bestimmter Bereiche anhand der durchzuspielenden Modelle der Nutzerbewegungen durchzuführen. Dabei variiert man die räumliche Gestalt bzw. Anordnung der zu planenden Bereiche systematisch. Molnár schlägt hierzu die Verwendung von *evolutionären Algorithmen* vor, um diese Berechnungen vom Computer automatisch durchführen zu lassen (Molnár 1995). Diese Methode hat sich bereits in anderen Bereichen bei der **Formoptimierung** als nützlich erwiesen (Rechenberg 1973; Schwefel 1977). Entsprechende **Bewertungskriterien** für die Nutzungsqualität der zu planenden Bereiche müssen bei der Erstellung der entsprechenden Modelle definiert werden. Ausgangspunkt ist die *Leistungsfähigkeit* hierbei, weitere Kriterien sind abhängig vom Nutzungszweck des zu planenden Bereiches sowie von der Nutzungssituation wie z. B. in einer Normalbelastung, einer Extrembelastung oder gar dem Katastrophenfall. Weitere Kriterien können also z. B. das Effizienzmaß als Kriterium für die Schnelligkeit bzw. Reibungslosigkeit, das Komfortmaß oder die Beeinflussungsstärke als das Maß für die Konzentration, die ein Mensch für eine kollisionsfreie Fortbewegung benötigt. Bisher wurden noch keine Simulationen zu infektionsrelevanten Themenstellungen durchgeführt. Entsprechende Kriterien müssten für diese Modelle definiert werden.

Auf Grundlage der Bewertungskriterien kann die Formoptimierung durchgeführt werden. Gegebenenfalls müssen die Simulationen jeweils für verschiedene Belastungssituationen wiederholt werden. Im Zuge der Optimierungsprozedur können entsprechende Faktoren variiert werden. Diese Faktoren bzw. Größen können zum einen die räumlichen Dimensionen der zu planenden Bereiche sein wie z. B. Form der Räume, Ein- und Ausgänge, Korridore sowie die Anordnung der einzelnen Komponenten zueinander, sowie die jeweiligen Funktionen und der Zeitplan der entsprechenden Bereiche der Gebäude- und Raumnutzung.

Dabei können die Simulationen nicht nur während der Vorplanung von Gebäuden wertvolle Dienste im Bereich der Formoptimierung leisten, sondern können auch in bereits

bestehenden Gebäuden zur Optimierung von Engpässen oder Problembereichen durch geeignete Änderungsmaßnahmen genutzt werden. Folgende einfache Beispiele sollen diese Möglichkeit der Formoptimierung, die mithilfe der Simulation des sozialen Kräftemodells berechnet wurden, verdeutlichen.

Durch die **Separation** von entgegengesetzten Fußgängerströmen durch Hindernisse wie Möbel oder Pflanzen kann die Effizienz und Stabilität der Bewegung gesteigert werden. Ausbrechen und Überholen wird dabei reduziert. Durch die Hindernisse kann der Fußgänger nicht so gut eine vor ihm liegende vorübergehende Lücke erkennen, des Weiteren würde sich sein Weg durch die Hindernisse beim Bahnenwechsel erheblich verlängern und schlussendlich wäre es auch schwieriger wieder in den eigenen Strom hinein zu gelangen.

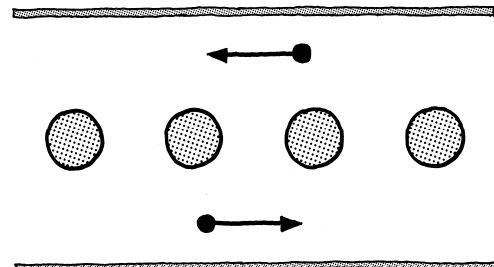


Abbildung 32: Separation in Bahnen (in Anlehnung an Helbing 2013)

Die Simulationen konnten ebenfalls zeigen, dass Fußgänger bei plötzlich auftretenden Verengungen des Weges in Ecken abgedrängt werden. Bei größeren Dichten kommen sie nur schwer dort wieder heraus und müssen sich seitlich wieder in die Laufrichtung hineindrängen, was wiederum zu Verengungen an diesen Stellen führt. Aus diesem Grund sollten Verengungen **trichterförmig** ausgebildet werden.

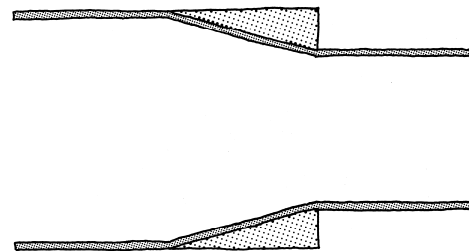


Abbildung 33: Spurverengung durch Trichterform (in Anlehnung an Helbing 2013)

An Wegekrenzungen kann man durch ein Hindernis im Mittelpunkt der sich überlappenden horizontalen und vertikalen Bewegungsrichtungen einen **Kreisverkehr** initialisieren und damit die Fußgängerbewegungen stabilisieren bzw. effizienter gestalten. Um die Rotationsrichtung gleichgerichtet zu halten, werden mithilfe **psychologischer Führungsstrategien** in Form von **visuellen Reizen** die Passanten in eine entsprechende Richtung gelenkt.

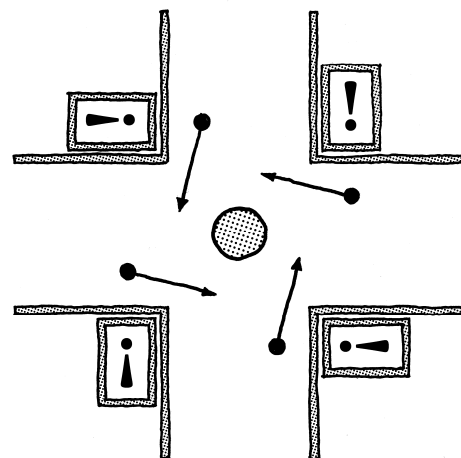


Abbildung 34: Bildung eines Kreisverkehrs (in Anlehnung an Helbing 2013)

Die Mikrosimulationsmodelle konnten ebenfalls zeigen, dass breitere Türen nicht zwangsläufig den Fußgängerfluss effizienter gestalten. Besser ist es, zwei Türen zu planen, die in Summe die gleiche Breite haben wie die große Tür. Bei geeignetem Abstand der Türen, werden diese jeweils von einer Laufrichtung genutzt und die Bewegungseffizienz gesteigert. Diese Aufteilung der Nutzung der Türen geschieht durch **Selbstorganisation der Nutzer**. Der Abstand der Türen darf nicht zu groß ausfallen, da ansonsten wieder der gleiche Effekt der Oszillation an Einzeltüren auftritt.

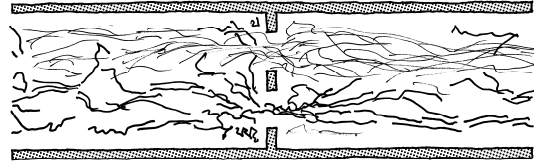


Abbildung 35: Selbstorganisierte Aufteilung von Durchgängen / Türen (in Anlehnung an Helbing 2013)

*

Allein diese vier einfachen Beispiele zeigen, dass sich mithilfe des *sozialen Kräftermodells* physikalische Kräftekonzepte so verallgemeinern lassen, dass sie sich zur Simulation von Bewegungsmustern eignen. Das dacht an den Sozialwissenschaften entwickelte Modell ist empirisch gut überprüfbar. Alle entsprechenden wesentlichen Größen wie Geschwindigkeiten, Orte, Distanzen der Personen und ihre Bewegungsrichtung lassen sich gut bestimmen. Die bei der Simulation zutage tretenden Selbstorganisationsphänomene wie z. B. die Entstehung einer Kreisbewegung an einer Wegekreuzung lassen sich durch Formfindungsprozesse der Bewegungsflächen weiter optimieren. Gerade in Bezug auf die Inter-Personelle- wie auch die Person-Objekt-Distanz bei der Optimierung der baulichen Infektionsprävention ist das soziale Kräftermodell ein weiter zu untersuchendes Werkzeug zur Planung und Konstruktion von bedarfsgerechten bzw. infektionsprophylaktischen Wegesystemen bzw. Bewegungsflächen.

*

Der Begriff **Computational Social Science** (rechnergestützte Sozialwissenschaften) wurde zum ersten Mal in seiner ganzen Vielschichtigkeit im Science Magazine im Jahre 2009 beschrieben (Lazer et al. 2009). Die zuvor beschriebene, von Sozialwissenschaften beeinflusste Personenstromsimulation stellt damit nur einen kleinen Ausschnitt des neuen Wissenschaftsfeldes dar, das sich mit soziokulturellen Phänomenen mithilfe von neuartigen Technologien und Datentypen auseinandersetzt. Weitere Teildisziplinen, die ebenfalls Computer dazu verwenden, um soziale Phänomene zu modellieren, simulieren und zu analysieren, sind dabei die **rechnergestützte Volkswirtschaftslehre**, die **rechnergestützte Soziologie**, die Kliodynamik, die Kulturomik (engl. *Culturomics*) und die automatisierte Analyse von Inhalten in sozialen und traditionellen Medien. Die **Kliodynamik** beschäftigt sich mit dynamischen Prozessen in der Geschichte und versucht daraus historische Entwicklungen mathematisch zu modellieren. **Culturomics** ist eine Form der computergestützten Lexikologie bzw. Wortschatzkunde, die menschliches Verhalten und kulturelle Trends durch die quantitative Analyse von digitalisierten Texten untersucht.

Es gibt zwei Terminologien, die miteinander in Beziehung stehen: **Social Science Computing (SSC)** und **Computational Social Science (CSS)**. In der Literatur wird CSS auf das Gebiet der Sozialwissenschaften verwiesen, dass die computergestützten Ansätze zur Untersuchung der sozialen Phänomene nutzt. Auf der anderen Seite ist SSC das Feld, in dem computergestützte Methoden entwickelt werden, um bei der Erklärung sozialer Phänomene behilflich zu sein.

Die **Computational Social Science** revolutioniert beide fundamentalen Beine der wissenschaftlichen Methode: Die **empirische Forschung**, insbesondere durch große Datenmengen, durch die Analyse des digitalen Fußabdrucks, der durch soziale Online-Aktivitäten hinterlassen wurde, und die **wissenschaftliche Theorie**, insbesondere durch den Aufbau von Computersimulationsmodellen durch soziale Simulation. Es handelt sich um einen multidisziplinären und integrierten Ansatz für die Sozialerhebung, der sich auf die Informationsverarbeitung mittels moderner Informationstechnologie konzentriert. Die Berechnungsaufgaben umfassen die Analyse von sozialen Netzwerken, sozialgeografischen Systemen, Social Media Inhalten und traditionellen Medieninhalten.

*

Für den Bereich der Dynamik-Mensch-Modellierung werden sich in den kommenden Jahren mithilfe der *Computational Social Science* weitreichende Möglichkeiten ergeben, die auch für die bauliche Infektionsprävention genutzt werden sollten. Diese können z. B. in der Nutzung von Bewegungsmustern, die über Social-Media-Trecking gewonnen wurden, für die Grundlagenparameterbestimmung der Mikrosimulationsmodelle liegen.

3.3.5 Nudging – Indirekte Beeinflussung des Menschen

Ein weiterer Bereich der Verhaltensökonomik, der ebenfalls durch die Arbeiten des Psychologen Kurt Lewin beeinflusst ist, prägt den sogenannten Begriff des **Nudge** (engl. für Stups). Dieser Begriff wurde maßgeblich durch das Buch *Nudge: Wie man kluge Entscheidungen anstößt* (Thaler und Sunstein 2009) einer breiten Öffentlichkeit bekannt. Die Autoren, der Rechtswissenschaftler Cass Sunstein und der 2017 mit dem Nobel-Preis für Wirtschaftswissenschaften ausgezeichnete Richard Thaler, verstehen unter einem *Nudge* die Methode, das Verhalten von Personen auf vorherbestimmbare Art und Weise zu beeinflussen. Dabei soll weder auf Verbote oder Gebote zurückgegriffen werden müssen, noch sollen dabei ökonomische Anreize verändert werden.

Ausgangspunkt der Theorie ist, dass Menschen nicht immer die optimale Entscheidung für sich selbst treffen, obwohl sie sich rational ihres Fehlverhaltens im Klaren sind. Sie treiben zu wenig Sport, essen ungesund, schieben zu erledigende Aufgaben vor sich her oder sparen zu wenig Geld für ihre Zukunft. Nach Thaler und Sunstein kann dies durch *Nudges* in eine positive Entwicklung gerichtet werden. Auftaktbeispiel in ihrem Buch ist die Positionierung von Obst in amerikanischen Schulkantinen in der Auslage auf Augenhöhe der Schüler, Süßigkeiten werden weiter weg einsortiert, oder ein

Spiegel hinter der Essenausgabe. Eine Studie hat gezeigt, dass dies zu gesünderem Essverhalten der Schüler geführt hat. Die überwiegende Anzahl von vorgeschlagenen Nudges befassen sich jedoch mit wirtschaftlichen Themen, wie z. B. der betrieblichen Altersvorsorge. Werden diese Nudges vom Staat eingesetzt, wird häufig vom sogenannten **libertären Paternalismus** gesprochen, was von Kritikern auch vorschnell mit *libertärer Bevormundung* gleichgesetzt wird, da der *Angestubste* wohlmöglich unbeteiligt am Prozess war.

Zur Umsetzung der *Nudges* gibt es unterschiedliche Methoden. Eine Möglichkeit ist es, bestimmte **Standards** (engl. Defaults) zu setzen. Dies kann z. B. die sogenannte **Voreinstellung** von so einfachen Dingen wie die standardmäßige Einstellung von Druckern auf *doppelseitig* sein. Hiermit konnte an der Universität New Jersey in vier Jahren 55 Mio. Blätter Papier eingespart werden. Oder die standardmäßige Voreinstellung bei Neubeschäftigung, dass man in die staatlich mitfinanzierte betriebliche Altersvorsorge einzahlt. Und nicht andersherum, dass man sich aktiv dafür entscheiden muss. Das kann sogar so weit gehen, dass alle Bürger automatisch Organspender sind, wenn man sich nicht aktiv dagegen entscheidet. Hierbei kommt es immer auf den voreingestellten bzw. definierten Standard ja/nein an. Was muss man selber aktiv an oder abwählen. Die meisten Standardeinstellungen funktionieren so einwandfrei, da die meisten Menschen träge sind und den Aufwand zur Selbstentscheidung und entsprechenden Umsetzung scheuen. Einfachstes Beispiel ist hierbei der Bildschirmschoner und Energieprofile an Rechnern, die von sehr wenigen Menschen tatsächlich arbeitsbezogen individuell eingestellt werden, obwohl dies zu einer großen Energieeinsparung führen könnte.

Des Weiteren haben Thaler und Sunstein in ihren Arbeiten erkannt, dass es oft wirkungsvoller ist, ein bestimmtes Verhalten zu fördern, indem man Hindernisse aus dem Weg räumt, als zu versuchen, jemanden in eine bestimmte Richtung zu lenken. Sie bezeichnen dies als **Bahnung**, nach Lewins Kanalfaktoren, dem verstärkenden Effekt von kleinen äußeren Einflüssen, eine bestimmte Verhaltensweise zu fördern. Dabei werden Hemmungen aufgrund von Hilfestellungen abgebaut und eine zielführende Handlung erst ausgelöst.

Genauso wie in der baulichen Infektionsprävention, bei der Ursache und Wirkung, also Planung und Bau und ihr Einfluss auf die Infektionsprävention, auch zeitlich so weit auseinanderliegen, haben Thaler und Sunstein erkannt, dass Probleme immer dann auftreten, wenn Entscheidungen und ihre Konsequenzen zeitlich voneinander getrennt sind. Dies ist dann der Fall, wenn man sich z. B. sportlich betätigen, eine Diät halten oder Zahnseide benutzen soll. All diese Dinge verlangen dem Menschen hohen Einsatz ab, doch seinen Erfolg sieht er erst nach einiger Zeit. Man könnte auch sagen, dass die Kosten sofort anfallen, der Nutzen aber erst viel später erfahren wird. In solchen Fällen neigen Menschen dazu, zu wenig zu tun.

Da Menschen diese Fehler machen, muss ein stabiles System, dies kann auch der umbaute Raum sein, eine **hohe Fehlertoleranz** aufweisen können. Im Bereich des Designs

können unterschiedlich hohe Fehlertoleranzen von Systemen, die durch das Fehlverhalten der Nutzer bestimmt wurden, ausgemacht werden. Manche Metro- oder Parkgaragen-Tickets können gelesen werden, egal wie sie in den Automaten gesteckt werden, obwohl sie auch nur einen Magnetstreifen haben. Die meisten Bank- oder Kreditkarten können an Bank- oder Supermarktschaltern nur in einer bestimmten Weise gelesen werden, obwohl es vier Möglichkeiten des Einzuges gibt. Der richtige Einschub muss daher meist noch zusätzlich bebildert, *Magnetstreifen unten links*, oder durch die Kassiererin erklärt werden. Im Bereich des Bauens kann hier als weniger optimales Beispiel genannt werden, dass viele Türanlagen nicht erkennen lassen, in welche Richtung die Tür aufschwingt. Der Nutzer weiß nicht, ob er ziehen oder drücken muss, wenn er die Tür durchschreiten möchte. Die Türen sind meistens optisch ansprechend entworfen, lassen aber keine Rückschlüsse auf ihre Funktionsweise zu. Die Nutzer ruckeln an den Türen, um die Aufschwingrichtung herauszufinden. Am Ende wird auch hier stupid *Drücken* bzw. *Ziehen* auf die Türen geschrieben.

Weitere fehlerhafte Verhaltensweisen werden durch unvorteilhafte Designentscheidungen unterstützt. So werden vorhersehbare Fehler, wie das Liegenlassen des Tankdeckels, das Vergessen des letzten Blattes im Kopierer oder das Vergessen der Karte am Bankautomaten als **Post Completion Error** bezeichnet (Byrne und Bovair 1997). Dabei neigen Menschen dazu, wenn sie eine Hauptaufgabe erledigt haben, Dinge zu vergessen, die in unmittelbaren Zusammenhang damit stehen. Dazu hat Donald Norman eine Alternativstrategie vorgeschlagen. Diese nennt er **Zwangsfunktion** (Norman 1990). Dabei muss man, um etwas zu bekommen bzw. zu erledigen, erst etwas anderes tun. Im Fall des Bankautomaten ist dies, dass man zuerst die Bankkarte vom Automaten entfernen muss, bevor man das Geld bekommt.

*

Architekten sind aufgrund ihres Arbeitsfeldes zwangsläufig *Nudger*. Für den Bereich der baulichen Infektionsprävention ist die Implementierung von *Nudges* in Form von *Standards*, *Voreinstellungen*, *Bahnung* oder *Zwangsfunktionen* daher weiter zu untersuchen. Die Bewegungsmuster von Menschen, ob nun in Bezug auf die Distanz oder z. B. im Bereich von Pflegeprozessen im Krankenhaus können mithilfe von *Nudges* sicherlich beeinflusst werden.

3.4 Methoden der digitalen Epidemiologie

Wie im ersten Kapitel beschrieben, befasst sich die Epidemiologie mit dem Vorliegen und der Ausbreitung von Krankheit und Gesundheit sowie deren Determinanten in der Bevölkerung. In jüngster Zeit stehen in unserem digitalen Zeitalter viele gesundheitsbezogene Daten elektronisch zur Verfügung. Diese Daten können traditionelle Studien und Erhebungsmethoden ergänzen und Auskunft über den Gesundheitszustand der Bevölkerung geben. Mit den Möglichkeiten dieser **digitalen Epidemiologie**, aber auch mit den Fehlschlüssen und Risiken befassen sich immer mehr interdisziplinäre Forschungsteams. In 2017 fand hierzu ein international besetztes Kolloquium am Robert Koch-Institut unter der Federführung von Dirk Brockmann, Leiter der Projektgruppe Epidemiologische Modellierung von Infektionskrankheiten, statt. Bei diesem Kolloquium wurden nicht nur die Möglichkeiten der Erweiterung traditioneller Ansätze der Epidemiologie diskutiert, sondern insbesondere Methoden aus der **Bioinformatik, moderner Netzwerktheorie, computergestützten Modellierung, maschinellern Lernen, High-Performance-Computing** und **Big-Data-Analytics** im Public-Health-Kontext dargestellt und diskutiert (Cattuto et al. 2017).

Brockmann selbst beschreibt seine Forschungsschwerpunkte am RKI als das Modellieren der Ausbreitung und Dynamik von Infektionskrankheiten (Brockmann 2016). Dazu entwickelt sein Team numerische Methoden, mathematische Modelle und anwendungsorientierte Computersimulationen komplexer Ausbreitungsphänomene. In diesem Zusammenhang versucht die Projektgruppe die Dynamik von Infektionsübertragungen mit Methoden der Theorie komplexer Netzwerke, der Komplexitätstheorie, der theoretischen Physik und der Spieltheorie im interdisziplinären Ansatz besser zu verstehen und vorherzusagen. Bei der Beschreibung und Vorhersage neuer global sich ausbreitender Erreger wie z. B. Influenza A (H1N1) oder SARS entwickelt das Team quantitative Modelle. Zentrale Aufgabe der Forschung ist hierbei, den Zusammenhang von räumlicher Ausbreitung und menschlicher Mobilität genau zu verstehen. Darüber hinaus wird die Dynamik von Infektionskrankheiten innerhalb bestimmter Populationen untersucht. So wird z. B. analysiert, wie soziale **Kontakt-Netzwerk-Strukturen** diese Dynamik der Infektionen bestimmen. Ebenso wird der Einfluss von Entscheidungsprozessen mit Hilfe spieltheoretischer Methoden im Kontext von z. B. der Impfprävention analysiert.

*

Die Möglichkeit des **computergestützten Modellierens** von z. B. Interventionsmöglichkeiten im Sinne einer baulichen Infektionspräventionsstrategie (*Interventionsstudie*) mit Hilfe der digitalen Epidemiologie würde ein wichtiges Instrument der interdisziplinären Infektionsforschung darstellen können. Das Modellieren der Intervention hat gegenüber dem realen Errichten bzw. Bauen von z. B. einer Schleuse oder ganzer neuer Layout-Settings von Bereichen, den überaus starken Zeit- und Kostenvorteil. Im

Folgenden sollen auf den Bereich des Bauens ausgesuchte Beispiele der digitalen Epidemiologie und ihre Methoden dargestellt werden.

3.4.1 Big-Data-Analyse

Ein Bereich der digitalen Epidemiologie macht sich „Big Data“ zu nutzen, d. h. sie erforscht die Unmengen an Daten, die sich aufgrund der modernen Kommunikation digital ansammeln. Milliarden von Menschen nutzen heutzutage das Internet und hinterlassen dabei ihre Spuren im Netz. Dies kann bei Suchmaschinenanfragen, der Nutzung von Nachrichtendiensten, sozialen Netzwerken und weiteren offenen Angeboten im Internet geschehen. Diese individuellen Spuren im Netz geben Auskunft darüber, wo sich die Nutzer aufhalten, mit welchen Inhalten sie sich beschäftigen oder welchen Lebensstil sie führen (Meier 2017).

Bei dieser Art der digitalen Epidemiologie wird das Verhalten, die Mobilität sowie die Interessen des Menschen anhand seiner digital vorhandenen Daten erfasst und monitorisiert. Dies wird auch **social tracking** genannt. Werden diese gewonnenen Daten dann z. B. mit Verkaufszahlen bestimmter Medikamente verlinkt, können spezifische Modelle erstellt und interessante Einsichten abgeleitet werden. Die Daten ermöglichen jedoch auch ein zeitnahes und kontinuierliches Spiegelbild von Gesundheitsverhalten sowie Krankheitsverläufen bzw. deren räumlichen Ausbreitungen. Ziel dieser Erhebungen kann ein frühzeitiges Erkennen von Krankheitshäufungen oder ein gezieltes Informieren bestimmter Bevölkerungsgruppen sein. Die Arbeitsgruppe von Marcel Salathé an der ETH Lausanne interpretiert Suchmaschinenanfragen, wie z. B. von *google*, oder Social-Media-Beiträge, wie z. B. auf *twitter*. Diese Beiträge werden mittels **maschinellen Lernens** nutzbar gemacht und beantworten damit Gesundheitsfragen (Salathé 2016). In diesem Zusammenhang ist die Frage erlaubt, ob diese Form der digitalen Epidemiologie in Form der Big-Data-Analyse nun die traditionelle Public Health Surveillance ersetzen wird?

Der Big-Data-Dienst *Google Flu Trends* wollte die Ausbreitung von Grippewellen nahezu in Echtzeit darstellen. Sein Algorithmus mit Blick in die Zukunft beruhte auf reiner Statistik. Er analysierte im Netz Suchanfragen, die er mit Häufigkeit und Art von tatsächlichen Grippefällen verglich und versuchte mögliche Korrelationen aufzuspüren. Das Modell unterschätzte 2009 das Ausmaß der Schweinegrippe (H1N1). Ebenso verfehlte es seine Zuverlässigkeit bei der Voraussage einer großen Grippe-Epidemie in 2012/13, die nicht eintraf (Lazer und Kennedy 2015). Angenommen wurde, dass die Symptome einer Grippe zu unspezifisch sind und damit bei der Analyse eine zu große Wahrscheinlichkeit von Fehlinterpretationen der Suchanfragen ergab. Der *Google Flu Trends* Dienst wurde daraufhin wieder eingestellt. Das gleiche Phänomen von Suchanfrage und tatsächlichem Auftritt einer Krankheit wurde weltweit für Windpocken untersucht. Eine Interpretation der Suchanfrage war hierbei besser möglich, da die Symptome von Windpocken einigermaßen spezifisch und damit eindeutiger der Krankheit

zuzuordnen sind. Dabei konnte gezeigt werden, dass es eine negative Korrelation zwischen den Suchanfragen zum Krankheitsbild der Windpocken und der Durchimpfungsrate, also der Höhe der Geimpften, gegen Windpocken in einem Land gibt.

Die Erfassung der digitalen Daten ermöglicht ebenso die sogenannte **personalisierte Medizin**, die eine auf Einzelpersonen oder spezifische Bevölkerungsgruppen abgestimmte Medizin erlaubt. So können medizinische Angebote entsprechend so präzise gestaltet werden, da über die Big-Data-Analyse ein Verständnis für die individuell-gesuchten Gesundheitsthemen unterschiedlicher Bevölkerungsgruppen herausgearbeitet werden kann. In der westlichen Welt wird die Analyse dieser Daten unter datenschutzrechtlichen Gesichtspunkten sehr kritisch gesehen. Hierbei wird argumentiert, dass die Versicherer, der allgemeine Markt bis hin zum Arbeitgeber diese Daten zu reinen Profitzwecken nutzen will.

Auf der anderen Seite muss man jedoch positiv festhalten, dass in weniger gut erschlossenen Ländern diese digital erhobenen und zur Verfügung gestellten Daten eine Anschlussmöglichkeit an neue Informationen, an Fachpersonal und an medizinische Versorgung bedeutet. Dabei ist zu bedenken, dass in vielen afrikanischen Ländern der Zugang zum Internet einfacher ist als der Zugang zu sauberem Trinkwasser oder medizinischer Versorgung (Meier 2017). So können gesundheitsrelevante Bedürfnisse Dank des digitalen Anschlusses besser erkannt oder abgefragt werden. Dies medizinische Unterstützung bezieht sich auch auf die Übermittlung von Bilddaten. Lokale Probleme können ebenso durch die Monitorisierung der digitalen Daten zeitnah ausgemacht werden.

*

Unumstritten bleibt die Frage nach den ethischen Aspekten der Big-Data-Analyse. Wem gehören diese Daten, wer darf sie nutzen, wie wird sichergestellt, dass keine Rückschlüsse auf Personen möglich sind usw.? Dies soll hier nicht abschließend geklärt werden, doch sollten sich Wissenschaftler in dieses Thema einbringen, wie die digitalen Daten der Big-Data-Analysen sinnvoll genutzt werden können, denn erfasst und interpretiert werden diese Daten ohnehin. Für den Bereich der baulichen Infektionsprävention werden im Folgenden mögliche Methoden dargestellt, die zum Teil auch mit Daten der Big-Data-Analyse unterfüttert werden.

3.4.2 Modellierung der Mobilität am Beispiel Flugverkehr

Das Verständnis für die Ausbreitung und Dynamik von Infektionsketten in unserer globalisierten Welt kann besonders deutlich mit Hilfe des internationalen Flugverkehrs beschrieben werden. Das Auftauchen neuer Erreger und ihre schnelle globale Ausbreitung sind zu den wichtigsten, aber auch am schwierigsten zu lösenden Problemen unseres Jahrhunderts geworden. Diese Entwicklungen zeigen z. B. die globale Ausbreitung von SARS (Schwere Akute Atemwegssyndrom) im Jahre 2003 (McLean 2005), die

H1N1-Influenza (Schweinegrippe) aus 2009, die Ebola-Krise aus 2012/2013 in Westafrika mit über 10.000 Toten, sowie das MERS-Coronavirus (MERS-CoV Middle-East Respiratory Syndrome CoronaVirus, Infektion der Atemwege, Lungenentzündung, Nierenversagen) in Süd-Korea und Saudi-Arabien.

Für die bauliche Infektionsprävention ist dieses Verständnis der globalen Zusammenhänge äußerst wichtig, da bestimmte Gebäudetypologien einen wichtigen Stellenwert in den beschriebenen globalen Infektionsketten einnehmen. So sind z. B. die Flughafenimmobilien wortwörtlich Dreh- und Angelpunkt im internationalen Flugverkehr und damit Sprungbrett für etwaige Erreger. Auch die Gesundheitsbauten sowohl im Erregerursprungsland aber auch in den eingebrachten Ländern sind zentrale Ablaufpunkte der globalen Infektionsketten. Will man die Ausbreitung und Dynamik von Infektionserkrankungen der globalisierten Welt in den Griff bekommen, so ist die bauliche - infektionsprophylaktische Ertüchtigung dieser wichtigen Knotenpunkte entlang der globalen Infektionsketten unumgänglich.

Brockmann beschreibt **zwei Schlüsselfaktoren**, die für die Entstehung neuer Erreger und die rapide weltweite Ausbreitung neuartiger Infektionskrankheiten mitverantwortlich sind bzw. diese begünstigen (Brockmann 2017). Auf der einen Seite führt die **exponentiell wachsende Weltbevölkerung** dazu, dass neuartige Erreger in immer schnelleren Zyklen entstehen, sich anpassen und weiterentwickeln. Die Weltbevölkerung ist allein seit 1990 um zwei Milliarden Menschen auf 7,5 Milliarden gewachsen. Die Zehn-Milliarden-Grenze soll bis 2050 durchbrochen sein. Die Mehrheit der Menschen lebt seit 2010 in dicht besiedelten Ballungszentren, den sogenannten Mega-Städten mit mehr als zehn Millionen Einwohnern. Dem gegenüber lebten noch im 19. Jahrhundert nur ca. 3% der Menschen in Großstädten. Aufgrund der hohen Besiedlungsdichte haben neue Erreger einen substantiellen Zugriff auf die Mehrheit der Weltbevölkerung in diesen Ballungsräumen (Lemey et al. 2014).

Als zweiter wichtiger Schlüsselfaktor im Bereich der schnellen weltweiten Ausbreitung von Krankheitserregern ist die **globale Mobilität** und die weltweite Vernetzung der zuvor genannten dicht besiedelten Ballungszentren zu nennen. Dies wird ermöglicht durch den internationalen Flugverkehr. Mehr als 4000 Flughäfen mit 25.000 Direktverbindungen werden durch das weltweite Flugverkehrsnetz miteinander verknüpft (Woolley-Meza et al. 2011). Jedes Jahr reisen dabei mehr als 3 Milliarden Menschen auf diesem Netzwerk. Täglich werden hierbei mehr als 15 Milliarden Personenkilometer zurückgelegt. Entscheidend bei der Betrachtung dieses riesigen Verkehrsflusses ist hierbei die hohe **geographische Ausbreitungsgeschwindigkeit** potentieller Erreger. Brockmann und Helbing berechneten die mittlere Ausbreitungsgeschwindigkeit des H1N1-Erregers während der Influenza-Pandemie im Jahre 2009 (Brockmann und Helbing 2013). Diese lag bei ca. 250-400 km/Tag. Im Vergleich dazu lag die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Pestpandemie im Europa des 14. Jahrhunderts bei ca. 3-5 km/Tag. Dabei benötigte sie mehrere Jahre von Südeuropa bis Skandinavien.

Durch das „Springen“ der Erreger von einem Flughafen zum Nächsten, kann hier leider nicht mehr von einer konstanten Geschwindigkeit in Form einer fortschreitenden **Wellenform** (Noble 1974) wie bei der Pestpandemie des 14. Jahrhunderts gesprochen werden. Wesentliche Voraussetzung der Darstellung der Pestausbreitung ist die räumlich beschränkte Dispersion, d. h. dass Bewegungen von größeren Entfernungen selten sind.

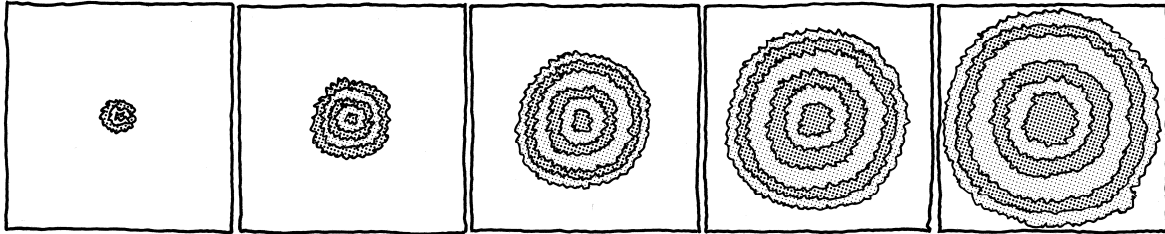


Abbildung 36: Vereinfachte schematische Darstellung: Regelmäßige Ausbreitungswellen mit konstanter Frontgeschwindigkeit wie z. B. bei der Pestepidemie 14. Jahrhundert (in Anlehnung an Brockmann 2017)

Aufgrund der heutigen sogenannten skalenfreien Mobilität dürfen die langen Wegstrecken wie beim Flugzeugverkehr, auch wenn sie weiterhin seltener sind als kurze Wegstrecken, nicht mehr vernachlässigt werden. Bei dieser skalenfreien Dispersion können Transmissionen über lange Distanzen getragen werden. Diese führen wiederum zu weit entfernten Sekundärausbrüchen. Das hierdurch entstehende raumzeitliche Muster in Form von **fraktalen Strukturen** ist komplexer und schwer zu prognostizieren. Aus diesem Grund kann man z. B. nicht mehr aus der konventionellen geographischen Distanz vom einem Ausbruchsort die entsprechende erwartete Ankunftszeit und Wahrscheinlichkeit einer Epidemie berechnet werden.

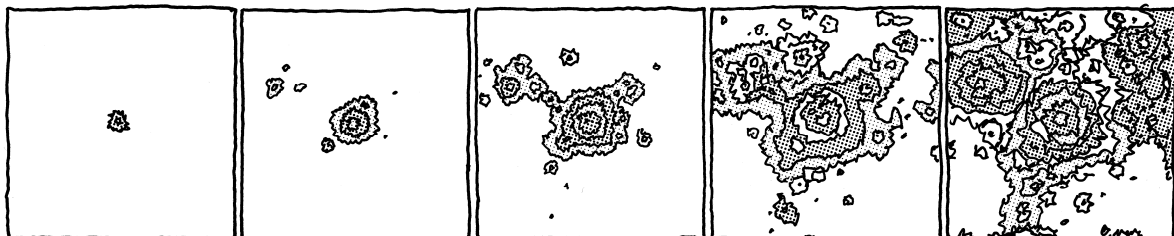


Abbildung 37: Vereinfachte schematische Darstellung: Skalenfreie Dispersion, über lange Distanzen springende Erreger, Sekundärausbrüche (in Anlehnung an Brockmann 2017)

Obwohl die strukturelle Komplexität dieser modernen Ausbreitungsmuster eine scheinbare Unvorhersagbarkeit suggerieren, wurden in den letzten Jahren **mathematische Modelle** erfolgreich aufgebaut und in detailreiche **Computersimulationen** implementiert. Das gesamte weltweite Flugverkehrsnetz wurde erstmals 2004 als Datengrundlage für den Aufbau der Computersimulation, inspiriert durch physikalische Modelle, zur Ausbreitungsbeschreibung von SARS genutzt (Hufnagel et al. 2004). Aufgrund ihrer unerwartet genauen Beschreibung der tatsächlichen Ausbreitung von SARS entstanden in Folge eine ganze Reihe von neuen Modellen und Computersimulationen dieser Art (van den Broeck et al. 2011; Colizza et al. 2007). Dabei wurde eine zweite wichtige Quelle als methodische Neuerung in der modernen Modellierung genutzt. Die pervasive Big-Data-Quelle, die Berücksichtigung großer Datenmengen aus Social-Media-

Inhalten-gewonnen Datenerhebungen. Dabei werden nun nicht mehr nur die Daten aus dem weltweiten Flugverkehr, sondern auch individuelle Mobilitätsdaten mittels Smartphone-GPS-Datengewinnung, Dichte und Alter von Populationen bestimmter Regionen sowie saisonale Schwankungen in infektionsdynamischen Komponenten zur Erstellung der mathematischen Modelle für die Computersimulation eingearbeitet (van den Broeck et al. 2011). Der Erfolg dieser Modellierungen liegt in der Integration transsektoraler Forschungsdisziplinen. Dabei werden Methoden der nichtlinearen Dynamik, der modernen statistischen Physik, Komplexitätstheorie, Informatik und der modernen Netzwerktheorie in die traditionelle, statistikgeprägte epidemiologische Modellierung eingebracht (Brockmann 2017).

Diese fächerübergreifende komplexe Betrachtung führt zum eigentlichen **prinzipiellen Dilemma** der **prognostischen Modellierung** globaler Ausbreitungsphänomene. Der Aufbau und das Unterfüttern mit Informationen dieser neuen Modelle kann durch eine Vielzahl an Parametern erfolgen. Dies können Transmissionswege oder populationsgemittelte Infektionsraten von Erregern sein, deren epidemiologische relevante Eigenschaften vielleicht noch gar nicht oder nur kaum bekannt sind. Da hierbei jedes Detail wichtig sein könnte, kam es zu einer Entwicklung in Richtung „**Mehr ist besser**“. Diese nach oben offene Spirale bringt Modelle hervor, deren Komplexität gleichsam schwierig zu verstehen ist wie das Phänomen, das eigentlich beschrieben werden soll. Um diesem prinzipiellen Dilemma zu begegnen, müssen neue Wege gefunden werden, die es ermöglichen, dass zuverlässige Vorhersagen mithilfe hochkomplexer Computersimulationen gemacht werden können, bei denen geklärt werden muss, welche bestimmenden Faktoren essentiell sind und welche ggf. vernachlässigt werden können, um das Modell als solches beherrschbar zu gestalten, ohne die Qualität der Vorhersage deutlich zu mindern.

Brockmann und Helbing entwickelten eine Theorie zur Lösung dieses Dilemmas (Brockmann und Helbing 2013). Kernthese hierbei ist, dass die hohe Komplexität der Modelle durch die tradierte Sicht der geographischen Entfernung bei der Ausbruchsmusterbetrachtung hervorgerufen wird. Dabei muss zur Beschreibung der globalisierten Welt und ihrer neuen globalen Mobilität der Begriff der Distanz neu definiert werden. Aufgrund der Möglichkeit des sogenannten „Springens“ per Flugzeug über große Distanzen müssen „neue Karten“ entworfen werden, die nicht mehr die rein geographischen Entfernungen zum Maßstab haben, sondern durch die Konnektivität ihrer Punkte bzw. Städte beschrieben werden. Dabei werden Regionen oder Orte, die stark verknüpft sind, als „effektiv“ näher, Orte die nur schwach verknüpft sind, „effektiv“ weiter entfernt dargestellt. Das effektive Entfernungsmaß ersetzt hierbei die konventionelle geographische Entfernung. Als Beispiel kann hier ein Passagier am Flughafen Heathrow genannt werden, der effektiv näher an den New Yorker Flughäfen verortet ist als z. B. einem kleinen Flughafen von Schottland. Dieser neue Begriff der **effektiven Distanz** berücksichtigt also qualitativ stark verknüpfte Knoten bzw. Flughäfen gegenüber schwach gekoppelten Knoten. Bei der Darstellung dieser neuen Karten liegt der Ursprungsort in

der Mitte der Karte und die effektiven Distanzen zu den verknüpften Orten liegen radial je nach Effektivität um diesen Ursprungsort herum. Größter Vorteil bei der Darstellung des Flugnetzes mithilfe der effektiven Distanzen ist, dass die vormals räumlich komplexen Ausbreitungsmuster wie oben beschrieben in teils fraktaler Form und schwer bestimmbar nun in regelmäßige, **konzentrische Wellenfronten** überführt werden und somit eine präzise Vorhersage z. B. für die Ankunftszeit einer Epidemie gegeben ist, wie zu Zeiten der Pestepidemie des 14. Jahrhunderts.

Zweiter Vorteil der Darstellung mittels effektiver Distanzen ist die Lösung des sogenannten **invers problem**. Oftmals wird eine Epidemie erst erkannt, wenn sie sich schon unerkannt in einer Population ausgebreitet hat und man den Ursprungsort aufgrund geographisch inkohärenter Muster nicht bestimmen kann. Mithilfe der Methode der effektiven Distanz kann man nun das bestehende Ausbreitungsmuster aus den Perspektiven möglicher potentieller Ursprungsorte analysieren, in dem man diese ins geometrische Zentrum der Betrachtung stellt, und isoliert denjenigen „Fall“, aus dessen Sicht das Ausbreitungsmuster konzentrisch ist. Diese Methode wurde bereits erfolgreich im Kontext der EHEC / HUS-Epidemie (Enterohämorrhagisches Escheria coli / hämolytisch-urämisches Syndrom, Darmerkrankung) 2011 in Deutschland angewendet (Manitz et al. 2014).

*

Übertragen auf die bauliche Infektionsprävention könnte der Begriff der effektiven Distanz genutzt werden, um nicht die reale Distanz z. B. zwischen zwei Patienten in einem Zwei-Bett-Zimmer zu beschreiben, sondern deren effektive Distanz, die durch z. B. die Pflege-Prozesse des Personals beschrieben werden können. Ebenso könnten durch die Beschreibung von effektiven Distanzen die Zusammenhänge in Gebäuden besser verstanden und darauf reagiert werden.

3.4.3 Ablaufverfolgung am Beispiel Warenkette

Lebensmittel stellen einen wichtigen Teil der möglichen Übertragungswege von Infektionen dar. Der Warenweg vom Ursprungspunkt der Produktion, ob tierisch oder pflanzlich, bis zum Endverbraucher ist in unserer globalisierten Welt immer länger und komplexer geworden. Die Gebäude als Gelenke und Kettenglieder entlang dieser Warenkette stellen einen wichtigen Faktor bei der Infektionsprävention dar, sei es der Schweinestall, das Schlachthaus, das Kühllager, die Schiff- und Flughäfen, Supermärkte, Großküchen bis hin zum Essplatz des Endverbrauchers. Zur Eindämmung einer lebensmittelassoziierten Epidemie ist es überaus wichtig, die ursprüngliche Kontaminationsquelle und ihren zurückgelegten Weg entlang der Warenkette identifizieren zu können. Aus diesem Grund wurden in den letzten Jahren Methoden und Werkzeuge entwickelt, die ein Verfolgen und Aufspüren entlang der Warenkette möglich machen. Diese Ablaufverfolgung bis zum Ziel wird in diesem Zusammenhang **Tracing** für das Aufspüren des Kontaminationsweges /- Kette und **Tracking** für die Überwachung des eigentlichen

Trägers der Infektion genannt. Weiser und Kollegen beschrieben erstmals diese sogenannten Trace-Back und Trace-Foreward Tools in beide Richtungen entlang der Warenkette im Zusammenhang mit der EHEC / HUS-Epidemie (STEC O104:H4) im Jahre 2011 und zeigten damit die Möglichkeit für generische Konzepte zukünftiger Ausbruchssituationen (Weiser et al. 2013). Das Bundesinstitut für Risikobewertung hat in diesem Zusammenhang mehrere solcher Werkzeuge bzw. Tools aufgebaut und online im Portal der sogenannten FoodRiskLabs (BfR 2017d) zur Verfügung gestellt.

Für den Bereich der Mikrobiologie wird hierbei das Tool PMM-Lab (Predictive Microbial Modelling Lab) zur Modellierung von mikrobiellem Wachstum bzw. der Inaktivierung von Bakterien und Toxinen zur Verfügung gestellt. Die **prädikative Mikrobiologie** stellt hierbei einen Zweig der Mikrobiologie dar, der sich mit der mathematischen Modellierung zur Abschätzung mikrobiellen Wachstums in Lebensmitteln beschäftigt. Hinterlegt ist dieses Tool noch mit Wissensdatenbanken für prädikative mikrobielle Modelle (open Food Safety Knowledge Lab) und Datenbanken für prädikative Mikrobiologie in Lebensmitteln (OpenML for Predictive Modelling in Food). Das Tool **FoodProcess-Lab** ist eine Open-Source-Software und kann für die Entwicklung von mikrobiellen Vorhersagemodellen auf Lebensmittelprozessketten wie z. B. bei Produktionsschritten in Brauereien oder Molkereien eingesetzt werden. Mit ihrer Hilfe sollen mikrobielle Entwicklungen in Produktionsprozessen überwacht und Entscheider bei der Risikobewertung unterstützt werden.

Für den Bereich der baulichen Infektionsprävention sind die Tools BfR-Produktschutz-Checkliste (BfR = Bundesinstitut für Risikobewertung) und FoodChain-Lab anwendungsbezogener. Die **BfR-Produktschutz-Checkliste** wurde am BfR im Rahmen des Projekts „Sicherstellung der Futter- und Lebensmittelwarenkette bei bio- und agroterroristischen (BAT) Schadenslagen“ entwickelt. Sie wurde ursprünglich entwickelt, um präventiv die Gefahr für eine absichtliche Kontamination in der Lebensmittelkette zu minimieren (BfR 2017a). In der Praxis können ihre Fragestellungen aber ebenso effektiv helfen, die unbeabsichtigte Kontamination zu reduzieren. Im Fragenkatalog werden Themenfelder abgefragt, die sich mit dem internen Management des Unternehmens als Teil der Warenkette befassen, wie z. B. nach geschultem Personal zum Produktschutz, regelmäßige Defizitanalysen der vulnerablen Punkte der Prozessabläufe im Betrieb oder Kommunikationsmaßnahmen im Krisenfall. Den Hauptteil der Checkliste stellt aber der Fragenteil zu den baulichen Bedingungen des Betriebes dar. Darin werden Themen wie die autorisierte Zutrittsregelung, Notfallsysteme, Produktions-, An- und Ablieferungsbereiche, Lagerräume, Lüftungsanlagen etc. abgefragt und schlussendlich über einen Produktschutzindex berechnet. Für den Bereich der baulichen Infektionsprävention sind solche Fragestellungen im Übertrag für typologisch anders gelagerten Gebäude eine hilfreiche Grundlage bzw. Ergänzung.

Die Tracing-Software **FoodChain-Lab** ist eine leicht zu handhabende Open-Source-Software zur Rück- und Vorverfolgung von Lebensmitteln entlang von Warenketten

(Weiser et al. 2016). Diese Warenketten können im ungünstigsten Fall mit Infektionsketten gleichgesetzt werden. Die Software ermöglicht integriertes Datenmanagement, Datenanreicherung, Datenvalidierung, interaktive Analysen sowie die Visualisierung von Warenketten. Dabei werden für jedes Produkt (Zutat oder Lebensmittel) und jedem Warenkettenstandort (z. B. Küche oder Lebensmittelhersteller) Wahrscheinlichkeiten, die mit einem Ausbruchsgeschehen in Verbindung stehen könnten, geschätzt. Das Tool ermöglicht darüber hinaus die Simulation von Kreuzkontaminationen bei der Verarbeitung oder Herstellung und, für den Bereich der baulichen Infektionsprävention wertvoll, die Betrachtung von möglichen geographischen bzw. räumlichen Zusammenhängen. Im ersten Schritt werden die raumbezogenen Daten mithilfe des Geokodierens erhoben bzw. die Datensätze angereichert, um dann im zweiten Schritt die Daten mittels GIS-Modulen (Geo-Information-System-Modulen) zu bewerten und zu visualisieren. Die Nutzung von FoodChain-Lab trug in den Jahren 2013/14 zur Aufklärung des multinationalen Hepatitis A-Ausbruchs in Europa bei (EFSA 2014).

Natürlich ist die FoodRiskLabs-Plattform des Bundesinstituts für Risikobewertung nicht das einzige Projekt bzw. Tool, wenn man zum Thema der Ablaufverfolgung von Lebensmittelwarenketten recherchiert. In diesem Zusammenhang müssen auch das „R-Project for Statistical Computing“, das „KNIME-Tool“ (Konstanz Information Miner) sowie das „STEM-Project“ (The Spatiotemporal Epidemiological Modeler Project) genannt werden. Letztgenanntes setzt sich stark mit der räumlich-zeitlichen (spatio-temporal) Komponente der Infektionsausbreitung auseinander. Alle diese Projekte fließen in die FoodRiskLabs-Plattform mit ein.

*

Das Verständnis für die Wirkungsweise dieser entwickelten Tracing-Tools kann Rückschlüsse für die Entwicklung von weiteren Strategien zur bauliche Infektionsprävention als Teil dieser Waren-/ Infektionskette leisten. Es muss geprüft werden, ob es im Bereich der Entwicklungsmöglichkeit der Tracing-Software von Warenströme nicht nur die Warenkettenstationen bzw. Standorte in die Risikobewertung und Visualisierung mit einfließen können, sondern diese einzelnen Bereiche noch einen Skalenbereich detaillierter erfasst werden könnten, um räumliche Zusammenhänge z. B. im einzelnen Betrieb, Großküche etc. aufzunehmen. Das hieße, die Lücke zu schließen zwischen dem FoodProcess-Lab der Lebensmittelprozesse und dem FoodChain-Lab der Standorte / Stationen der Kette.

3.4.4 Elektronische Kartierungswerkzeuge

Im Kapitel „Räumliche Verortung der Gesundheit“ wurde gezeigt, wie die Kombination aus Geografie und Epidemiologie im Sinne der Gesundheitsgeografie das Verständnis von Gesundheit und Mensch gerade im räumlichen Kontext erklären kann. Die Nutzung der Geographischen Informationssysteme (GIS) deckt hierbei einen weiten Bereich auf

unterschiedlichsten Skalierungsebenen ab. So können Informationen in diesen Gesundheitskarten (Health-Mappings) für weltweite aber auch für nationale, regionale bis hin zu lokalen Zusammenhängen dargestellt werden. Auf diese Weise kann z. B. die Säuglingssterblichkeit im internationalen Vergleich zu sozialen Bedingungen visualisiert werden (Schweikart und Kistemann 2013). Im regionalen Zusammenhang muss die viel zitierte Kartierung der Choleratoten eines Stadtteils Londons von John Snow (Snow 1855) genannt werden. Im lokalen Kontext eines Krankenhauses konnte mit Hilfe der ortsbezogenen, geographischen Aufzeichnung eines Salmonella-Ausbruchs sein Ursprung und damit auch seine Ursache aufgeklärt werden (Kistemann et al. 2000). Heutzutage können die Informationen der GIS mit Hilfe elektronischer Kartierungswerkzeuge (Mapping Tools) zu wichtigen Werkzeugen der räumlichen digitalen Epidemiologie im Sinne der baulichen Infektionsprävention genutzt werden. Aus diesem Grund sollen diese Mapping Tools und ihre Wirkungsweise kurz erklärt werden.

Mapping-Tools im Gebrauch moderner Geographischer Informationssysteme (GIS) sind Werkzeuge, mit denen raumbezogene Daten auf entsprechenden Computersystemen verarbeitet, analysiert, gespeichert und schlussendlich visualisiert werden können (Höser 2017). Die für Mapping- bzw. GIS-Aufgaben notwendige Software hierfür ist aus diversen Quellen verfügbar. Neben kommerziellen Programmen sind auch kostenlose oder Open-Source-Software-Angebote erhältlich. Diese decken eine Fülle von Anwendungsszenarien ab.

Sogenannte **Dashboard-Lösungen** stellen am Bildschirm in Form eines Reports eine interaktive Schnittstelle zu Daten dar, die neben der eigentlich zu generierenden Karte auch noch Diagramme visualisieren und animieren kann. Die Stärken dieser Reports liegen somit in ihrer Visualisierung. Dabei verwendet ein dynamischer Report stets die aktuell zur Verfügung stehenden Daten und visualisiert die Ergebnisse mit Hilfe einer Musterschablone.

In der Epidemiologie müssen bei der Betrachtung der räumlichen Ausbreitung regelmäßig auch die zeitlichen Aspekte berücksichtigt werden. Aus diesem Grund sind Mapping-Tools, die zeitlich-räumliche Modelle, in diesem Zusammenhang **spatio-temporale Modelle** genannt, bei der Analyse epidemiologischer Fragestellungen berücksichtigen von Vorteil. Bei der räumlichen Simulation von Ausbreitungsmodellen werden häufig Multi-Agenten-Systeme verwendet. Bei der **Multi-Agenten-Simulation** werden die aktiven Komponenten des zu simulierenden Systems *Agenten* genannt. Das Verhalten der Agenten kann einzeln spezifiziert werden. Auf diese Weise können dynamische Wechselwirkungen und zusammenhängende Phänomene im System nachgewiesen werden. Nicht nur in der Epidemiologie oder der Gesundheitsgeographie werden solche Multi-Agenten-Simulationen eingesetzt, sie sind auch verbreitet in der Soziologie, Biologie, Verkehrsphysik, Evakuierungssimulation oder makroökonomische Wirtschaftssimulation. Dabei werden Multi-Agenten-Simulationen verwendet, um einerseits Zusammenhänge zu begreifen, andererseits Theorien in einer virtuellen, kontrollierten Laborumgebung zu überprüfen. Werden die Agenten in einer simulierten

räumlichen Umgebung diskret abgebildet, so ist der Übergang zur Modellierung mit zellulären Automaten fließend.

Zelluläre Automaten werden bei der Modellierung räumlich diskreter dynamischer Systeme eingesetzt. Dabei ist die Entwicklung der einzelnen Zelle von den Zellzuständen seiner Nachbarschaft abhängig. Der zelluläre Automat bzw. Zellularautomat wird dabei durch vier Größen definiert: Durch einen *Raum* R (Zellularraum), eine endliche *Nachbarschaft* N , eine *Zustandsmenge* Q und eine *lokale Überföhrungsfunktion* $\delta:Q^N \rightarrow Q$. In der Regel ist der Zellularraum ein- oder zweidimensional. Er kann aber auch durchaus höherdimensional sein. Die *globale Konfiguration* beschreibt das Erscheinungsbild des gesamten Zellularautomaten. Dabei wird jeder Zelle des Automaten ein individueller Zustand zugeordnet. Geht nun eine Zelle von einem Zustand (*lokale Konfiguration*) in den nächsten über, so wird dies über die *Zustandsübergangsregeln* definiert. Diese können stochastisch oder deterministisch, d. h. nach statistischer Wahrscheinlichkeit oder direkt eindeutig festgelegt sein. Für alle Zellen erfolgen die Zustandsübergänge gleichzeitig nach der gleichen Überföhrungsfunktion. Ebenso wie die Zeitabfolgen können die *Zellzustände* diskret sein, d. h. sie sind unterscheidbar, trennbar und abzählbar. Die Anzahl der möglichen Zustände ist in der Regel klein. Zur Simulation selbst hochkomplexer Systeme reichen meist nur wenige Zustandswerte aus.

*

Ein besonderer Aspekt der Verständigung mit Karten ist die Integration von zeitlichen Vorgängen oder die Verbindung unterschiedlicher Ansichten in eine zumeist interaktive Visualisierung. Diese fortlaufende Visualisierung wird auch **storytelling** genannt. Dabei können sehr komplexe Abläufe in nachvollziehbare und verständliche Schritte untergliedert werden.

Durch die Überlagerung der Disziplinen Medizin und Geographie verfolgt die Gesundheitsgeographie bereits einen interdisziplinären Ansatz an sich. Aber auch hierbei lassen sich in benachbarten Disziplinen Anwendungen entdecken, die sich ggf. für spezielle Fragestellungen der Gesundheitsgeographie entlehnen lassen. Die Verwendung von professionellen Tools zur Netzwerksimulation und Ausbreitungsmodellen wie bei der Kriminalistik, Bevölkerungsforschung, Meteorologie oder Netzwerkforschung finden in der Gesundheitsgeographie vermehrt ihre Anwendung.

Aufgrund der Vielzahl an möglichen Mapping-Tools bzw. Kartierungswerkzeug-Programmen ist es sinnvoll, am Anfang des Projekts zu definieren, welche Ziele erreicht werden sollen, um damit die entsprechende Methodik inklusive des erforderlichen Arbeitsablaufes vorzugeben. Im sogenannten **workflow** werden dabei die grundlegenden Entscheidungen über alle wesentlichen Schritte modelliert. Dies erleichtert die Übersicht bei Prozessen mit zahlreichen Beteiligten, unterschiedlichen Rollen und parallelen Ereignissen (van Limburg et al. 2011). Über den so skizzierten workflow kann später ein störungsfreier Ablauf erfolgen. Dies erfolgt prinzipiell wie bei einem Prozessmanagement. Die Werkzeuge für die Notation eines Geschäftsprozessmodells, in diesem

Fall die Verschriftlichung des workflows, können genutzt werden (Hesse 2016; Berliner BPM-Offensive 2016; Hesse 2016). Die Kenntnis über den workflow ist für die Wahl der GIS-Software hilfreich, auch um das Anforderungsprofil für ein bestimmtes Tool zu präzisieren. Darauf aufbauend erfolgt die Auswahl einer projektspezifischen Software. Diese kann auch mit Hilfe von aktuell gepflegten Vergleichslisten auf z. B. wikipedia geschehen.

Für die Zukunft muss festgehalten werden, dass die Potentiale von Mapping-Tools gerade auch für den Bereich der baulichen Infektionsprävention im intersektoralen Kontext noch besser genutzt werden müssen. In diesem Zusammenhang muss auch über die Datenquellen und damit auch über den Datenschutz weiter diskutiert werden. Das Zusammenspiel von Gesundheit, Mensch und Raum kann hierbei besser verstanden werden, wenn sogenannte indirekte Anzeiger, auch als **Proxies** bezeichnet, untersucht werden. Dies gilt im speziellen, wenn die Verfügbarkeit von Informationen zu den Proxies schneller, einfacher und billiger zu beschaffen ist. So können beispielsweise Risikopotentiale vorhergesagt werden, wenn die Proxies aus einer frühen Phase der Risikobildung stammen, wie z. B., wenn bestimmte Umweltbedingungen für die indirekte Erregerübertragung durch Vektoren nachgewiesen werden können (Höser 2017).

Auch die Gesundheitsgeographie hat erkannt, dass die allgegenwärtige Erfassung von Informationen durch die globale Vernetzung von mobilen Geräten sowie die indirekte Analyse von Netzaktivitäten auf einer Metaebene eine überaus große Datenquelle darstellt. Wie bereits im Kapitel *Big-Data-Analyse* beschrieben, sind auch im Bereich der Auswertung der Daten bei Mapping-Tools bzw. GIS die Qualität der Rohdaten, ihrer Analysen und entsprechenden Aussagen kritisch zu betrachten. Ein großes Potential ist dennoch vorhanden, wenn die entsprechenden Rahmenbedingungen angemessen berücksichtigt werden (Driedger et al. 2007).

Zurzeit werden im Gesundheitswesen weitere wichtige und qualitativ hochwertige Datenquellen für räumliche Analysen erschlossen. Das Informationspotential der Datenbanken von Krankenkassen, ärztlichen Verbänden und auch Krankenhäusern ist durchaus bekannt. Sukzessive wird aber erst jetzt bewusst, welcher Gewinn an Informationen zum Nutzen der Menschen durch GIS-Anwendungen zu erreichen ist. Als ein Beispiel soll hier der Versorgungsatlas des Zentralinstituts für die kassenärztliche Versorgung (Mangiapane 2014) genannt werden. Die vollständige Nutzung der schon heute zur Verfügung stehenden Informationen wird durch den Datenschutz verhindert. Die spatio-temporale also räumlich-zeitliche Auflösung der Daten wird hierdurch beschränkt. Eine Güterabwägung zwischen Datenschutz und Gesundheitsschutz findet kaum statt oder wird gänzlich zugunsten des Datenschutzes entschieden (Höser 2017). Die Ursache für den Ausgang solcher Abwägungsentscheidungen liegt im Unwissen über die Leistungsfähigkeit solcher Analysen von qualitativ hochwertigen räumlichen Daten.

Zukünftig werden Geo-Informationen-Systeme auch weiterhin die Erforschung komplexer Zusammenhänge unterstützen. Dabei wird auch der Maßstab frei skalierbar sein.

Dies kann von globalen Aspekten wie bei *One Health* oder *Global Health* (Tian und Xu 2015) bis hinunter zu ganz lokalen Untersuchungen über die Ausbreitung von Pathogenen auf einer Krankenhausstation (Kistemann et al. 2009) reichen.

Eine entscheidende Aufgabe hierbei wird sein, die gewonnenen Erkenntnisse aus der räumlichen Analyse der vorhandenen Daten im Gesundheitswesen so nutzbar zu machen, dass sie noch handlicher im Planungsprozess für Entscheider implementiert werden können. Dies ist neben der Unterstützung von Katastrophenschutz, Umweltplanung und Public-Health-Planning auch die Unterstützung der Versorgungsinfrastrukturen und damit des Gebäudes.

*

Kistemann entwickelt den Begriff des **InfektionsInfoSystems (IIS)** zur Beschreibung der Nutzung Geographischer Informationssysteme für die Krankenhaushygiene (Kistemann et al. 2009). Dabei soll eine virtuelle und temporal animierte sogenannte **Kontaminationslandschaft** für eine spezifische Verknüpfung von Pathogenen und Primärinfizierten errechnet werden. Diese *Kontaminationslandschaft* wird zusätzlich mit Hilfe eines Real-Time-Location-Systems (RTLS) aufgebaut, das die Begegnungen und Aufenthalte aller Objekte und Personen zu individuell bestimmbaren Kontaminations- und Infektionsrisiken beinhaltet. Die unterschiedliche Tenazität (Zähigkeit des Mikroorganismus) und Infektiösität werden pathogenspezifisch in diesem *InfektionsInfoSystem* erfasst.

Notwendig wird dieses System erst, da die Krankenhaushygiene an ihre Grenzen stößt. Zentrale Aufgabe der Krankenhaushygiene ist die Prävention und Bekämpfung von nosokomialen Infektionen. Dabei werden in Deutschland jährlich etwa 16 Millionen Patientenfälle mit einer durchschnittlichen Verweildauer von 8,5 Tagen stationär behandelt. 500 bis 800 tausend dieser Patienten erleiden eine nosokomiale Infektion (Geffers et al. 2002). Etwa ein Drittel dieser Infektionen wäre durch konventionelle Präventionsmaßnahmen vermeidbar gewesen. Eine Million zusätzliche Krankenhausverweiltage verursachten allein die drei Infektionstypen Sepsis, Pneumonien und Wundinfektionen im Jahr 2005 (Pfeil et al. 2007). Für die Entstehung dieser Infektionen und Kolonisationen ist das räumlich-zeitliche Zusammentreffen von Krankheitserreger und Patient notwendig. Als Erregerreservoir sind dabei die Mitpatienten, das Personal, Besucher und die im ersten Kapitel beschriebene unbelebte Umwelt zu betrachten. Die unbelebte Umwelt im Krankenhauszusammenhang sind Wasser, Luft, Lebensmittel, Staub, Medikamente, Medizinprodukte, Ausscheidungen und nicht zuletzt Oberflächen bzw. Materialien. Dabei unterliegen alle an der Infektionsübertragung beteiligten Objekte und Akteure einer räumlich-zeitlichen Dynamik. Aus ihrer Verschneidung und Überlagerung ergeben sich dann die räumlichen Kontaktmuster. Prinzipiell zielen alle hygienischen Interventionen im Krankenhaus darauf ab, infektionsrelevante Kontaktketten zu unterbrechen oder gleich zu unterbinden. Dies kann aus baulicher Sicht die Isolierung infektiöser Patienten in Einzelzimmern darstellen. Auf der anderen Seite

können dies Einzelinterventionen wie die Händedesinfektion vor und nach Patientenkontakt oder die hygienische Aufbereitung von medizinischen Diagnostikgeräten zwischen zwei Untersuchungen sein.

Aus Sicht der Gesundheitsgeographie ist nun höchst interessant, welche räumlichen Kontaktmuster identifiziert werden können, um daraus Schlussfolgerungen für optimierte krankenhaushygienische Interventionen abzuleiten (Kistemann et al. 2009). In diesem Zusammenhang wären mögliche relevante Fragestellungen: Mit welchem Mitpatienten hat ein Patient auf der einen Seite direkten räumlichen Kontakt beispielhaft als Zimmernachbar oder auf der anderen Seite indirekten bzw. zeitlich versetzten „Raumkontakt“ wie z. B. bei der Nutzung der gleichen Sanitärzelle des Patientenzimmers? Wie lange bestand dieser Kontakt oder wie viel Zeit und welche räumlichen Wege lagen zwischen der Nutzung desselben Raumes bzw. Lokalität? In welcher räumlich-zeitlichen Reihenfolge fanden Kontakte zwischen einer Pflegekraft oder einem Arzt und mehreren Patienten statt? Wie sehen die räumlich-zeitlichen Wege der Medizinprodukte aus? Wie gelangen sie zum Patienten? Auf welchem Wege finden die Entsorgung bzw. Wiederaufbereitung statt? Wie sehen die Bewegungspfade bei beweglichen Medizingeräten aus? Wo kommen sie zum Einsatz, wo werden sie aufbereitet und gelagert? Auf welchen räumlichen Pfaden gelangt das Essen zum Patienten?

Auf separaten Informationsebenen des GIS lassen sich die Bewegungsprofile von jedem relevanten Objekt und jeder Person darstellen. Bei der Überlagerung dieser Ebenen bzw. Layer können Kreuzungspunkte ausgemacht werden und Kontakt- sowie Abstandszeiten bestimmt werden. Die Kenntnis dieser vielschichtigen Raum-Zeit-Dokumentation kann wesentlich zum Verständnis von Infektionswegen beitragen. Eine Überlagerung dieser Layer zeigt Abbildung 38 inklusive der krankenhausspezifischen Elemente.

Leider ergeben sich in der Praxis Einschränkungen bei der Präzision und Verfügbarkeit der räumlichen Informationen. Zwei Erfassungsmöglichkeiten werden hierbei unterschieden. Zum einen wird differenziert zwischen den Geometriedaten von Personen und Objekten. Zum anderen wird unterschieden zwischen manueller und automatisierter Erfassung der Lokalisation (Ortsbestimmung). Am einfachsten können noch die statischen Elemente des Krankenhauses zur Verfügung gestellt werden. Die Konstruktionspläne zu Grundrissen, Schnitten etc. liegen heutzutage als CAD-Daten (Computer Aided Design) digital bei den Architekturbüros bzw.

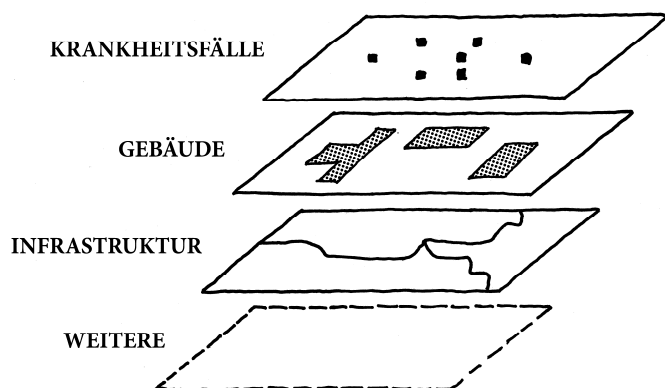


Abbildung 38: Objekt-Layer eines Geographischen Informationssystems (GIS) für Krankenhäuser (in Anlehnung an Kistemann et al. 2009)

Planungsabteilungen der Krankenhäuser zur Verfügung. Diese 2D- oder 3D- Daten können in die GIS-Software übertragen werden. Meist sind sogar die Informationen zur technischen Infrastruktur wie Lüftungskanäle, Kalt- und Warmwasserleitungen, medizinische Gase etc. schon in diesen digitalen Daten enthalten oder können ergänzt werden.

Dem gegenüber ist die Erfassung der beweglichen Objekte technisch anspruchsvoller und wesentlich zeitaufwändiger. Für den Einzelfall bzw. für die Untersuchung einer speziellen Fragestellung kann die Erfassung und Nachverfolgung (tracking und tracing) von infektionsrelevanten Gütern manuell erfolgen. Dies kann z. B. bei der Aufklärung eines bestimmten Ausbruchsgeschehens erfolgen. Die beschriebene Systematik wurde eingesetzt, um die räumlichen Zusammenhänge eines Salmonellose-Ausbruchs auf dem Campusgelände des Uni-Klinikums Bonn aufzudecken und nachzuvollziehen (Kistemann et al. 2000). Dabei wurden die täglichen Prozeduren der Speisenversorgung auf dem Klinikgelände verfolgt und protokolliert. Zur Visualisierung und weiteren Analyse wurden die erhobenen Daten in ein GIS übertragen. Mit Hilfe dieses präzisen Abbildes der Speisenverteilung könnte die ungleichmäßige Verteilung der Salmonelloseerkrankungen erklärt werden.

Das manuelle Nachverfolgen von mobilen Gütern bzw. Objekten stößt sehr schnell an logistische und kapazitive Grenzen. Eine technische Lösung hierfür stellt die **Radio Frequency Identification (RFID)** Technologie dar. Sie ermöglicht das **tracking** (Nachverfolgen) von markierten Objekten in Gebäuden und im offenen Gelände bei überschaubarem Installationsaufwand. So kann z. B. das Erneuern von Verbrauchsgütern oder auch Wartungsintervalle über dieses System kodiert und nachgehalten werden. Diese RFID-Technologie wird bereits im Krankenhaus eingesetzt, jedoch nicht zu infektionspräventiven Zwecken, sondern um teure medizinische Geräte wiederzufinden oder das Bettenmanagement zu organisieren.

Die Erfassung von menschlichen Bewegungsmustern stellt sich in diesem Zusammenhang (Patienten, Besucher und Personal) wesentlich schwieriger und datenschutztechnisch sensibler dar. Für überschaubare Bereiche, wie etwa eine Pflegestation, lässt sich dieses noch manuell bewerkstelligen, sofern es sich um einen kurzen Zeitraum im Zusammenhang mit z. B. einer Ausbruchsuntersuchung anlässlich einer Infektionshäufung handelt. Kistemann und Kollegen (Kistemann et al. 2009) konnten über die manuelle Erfassung von Patientenpfaden mit MRSA-Status einer Intensiv-Pflege-Station und deren Übertragung in GIS-Layer mit anschließender exakter raum-zeitlicher Analyse aufdecken, dass eine Reihe von vermeintlichen organisatorischen Zwängen, wie die Verteilung der Beatmungsplätze, Nähe zum Dienstplatz, verschiedene Größen der verfügbaren Intensivplätze etc., die Belegung der Intensivbetten erheblich stärker beeinflusste als die Vorgaben zur MRSA-Isolierung nach RKI-Richtlinien. Ebenso kam es infolge dessen immer wieder zu vermeidbaren Zusammenlegungen von MRSA-negativen und MRSA-positiven Patienten in einem Raum.

Möchte man nun die aufwendige manuelle Erfassung durch technische Systeme ablösen und zusätzlich nicht die Menschen mit RFID-Chips aus datenschutztechnischen Gründen ausstatten, so kann man versuchen, bereits etablierte Systeme der Krankenhaus-Infrastruktur und ihre erfassten Daten für die räumlich-zeitliche Analyse zur Darstellung der Kontaminationslandschaft neu zu interpretieren. So können z. B. die sogenannten Bedside-Computer, die fortlaufend Blutdruck, Puls, Sauerstoffsättigung etc. am Patienten messen, mit ihren Aufzeichnungen dazu beitragen, dass der Ort des Patienten lückenlos aufgezeichnet wird. Darüber hinaus können zusätzlich die Bewegungen des Personals zwischen den Patienten rekonstruiert werden, da es sich bei jedem Patienten am Bedside-Computer personenbezogen mit Namen einloggen muss und damit den Kontakt mit dem Patienten dokumentiert. In einer Untersuchung wurden derartige Bedside-Computer-Datensätze eines US-amerikanischen Krankenhauses zu hygienerelevanten Fragestellungen ausgewertet (Kho et al. 2006). Die erforderlichen Geometriedaten wurden aus den CAD-Plänen des Krankenhauses entnommen. Mit Hilfe der GIS-gestützten Auswertung der Bedside-Computer-Datensätze konnte gezeigt werden, dass bei 19 % der stationären MRSA-Patienten die erforderliche Isolierung nicht eingehalten wurde. Bei der Auswertung der Bewegungsmuster des Personals konnte in einem Einzelfall gezeigt werden, dass eine Krankenschwester in einem Zeitfenster von 33 Minuten Kontakt mit neun Patienten hatte. Die Zeitspanne zwischen den log-ins an den Bedside-Computern der unterschiedlichen Patienten betrug jeweils nur 1-2 Minuten. Für eine adäquate Händehygiene ist diese Zeit zu wenig, auch im Hinblick darauf, dass noch die Wegzeiten zwischen den Patienten berücksichtigt werden müssen.

Eine weitere Quelle zur Informationsbeschaffung ist die Analyse bereits bestehender Datenbankinformationen. In diesem Zusammenhang spielen die krankenhausinternen Datenerfassungssysteme für Management, Abrechnungssysteme, ICD (International Classification of Diseases) etc. einen wichtigen Part. Diese Systeme werden immer weiter standardisiert. Eine bereits bestehende definierte Kommunikationsschnittstelle wird über das sogenannte Protokoll „**Health Level 7**“ (**HL7**) definiert. Hierüber kann nun auf einen erweiterten Informationspool zugegriffen werden, um z. B. die Verlegehistorie von Patienten in einem Krankenhaus nachvollziehbar und visualisierbar zu machen, wenn dies aufgrund einer individuellen Gefährdung durch ein akutes Infektionsvorkommen abgeschätzt werden muss (Höser 2009).

Aus hygienischer Sicht wäre es im Krankenhaus durchaus sinnvoll, alle hygienerelevanten Personenbewegungen systematisch zu erfassen und GIS-gestützt auszuwerten, um damit alle relevanten raum-zeitlichen Kontaktmuster zwischen Personen (Patient, medizinisches Personal, Besucher etc.), Räumen, statischen und beweglichen Objekten (Diagnostikgeräte, Fallwagen, etc.) nachvollziehen zu können. Bereits im Jahre 2007 wurden die hierzu verfügbaren technischen Optionen im Rahmen einer Machbarkeitsstudie untersucht (Höser 2007). Die Studie zeigte, dass verschiedene technische Varianten verfügbar waren, um die gewünschte Bewegungserfassung zu ermöglichen. In

diesem Bereich gibt es vielversprechende Technologien wie RFID, Ultraschall und heutzutage bereits in Gebrauch auch bluetooth. Alle Bemühungen diese Technologien zur Bekämpfung von Infektionsketten im Krankenhaus in Deutschland zu etablieren, sind bis heute immer am Datenschutz gescheitert. Das Ausstatten des Klinikpersonals mit Signalgebern und das Aufzeichnen der Bewegungsmuster, auch wenn alle denkbaren Maßnahmen der Anonymisierung, Zugriffsbeschränkung und zeitnahen Datenvernichtung berücksichtigt werden, stellt aus datenschutzrechtlicher Sicht eine kritisch gesehene personenspezifische Vorratsdatenhaltung dar.

Im Ditan Krankenhaus in Peking, einer der größten Infektionskliniken Chinas, wurde ein auf Wi-Fi (auf IEEE 802.11 Standards basierende Klasse von Wireless Local Area Network (WLAN) Zugängen) basierendes **Real-Time-Location-System (RLTS)** etabliert. Dabei musste keine zusätzliche technische Infrastruktur geschaffen werden, da auf das bereits vorhandene Wi-Fi-Netz der Klinik zurückgegriffen werden konnte. Um die Verbreitung von Infektionen mithilfe der Aufenthaltsorte aller beteiligten Akteure zu kontrollieren, wurde zusätzlich das Klinikpersonal und die Patienten mit Wi-Fi-Anhängern ausgestattet (Kistemann et al. 2009).

*

Die zuvor beschriebene Möglichkeit, GIS zur Visualisierung einer Kontaminationslandschaft zu nutzen, zeigte die Aufdeckung relevanter Infektionsketten durch die Analyse raum-zeitlicher Kontaktmuster in retrospektiver Art und Weise. Wünschenswert ist natürlich auch die prospektive Vorhersage der Verbreitung von Infektionen. Auch hier könnten GIS-basierte Technologien in Zukunft einen entscheidenden Mehrwert leisten. Dabei ist es zur effizienten Eindämmung eines akuten Infektionsgeschehens erforderlich, den zeitlichen Vorteil des Krankheitserregers im Ablauf der Infektionskette gegenüber den Kontrollmaßnahmen aufzuholen. Damit kann man dem Erreger im aktuellen Stand seiner Verbreitung begegnen. Hierfür müssen sehr zeitnah die übertragungsrelevanten Kontakte aus der Kenntnis der Bewegungsmuster bereits infizierter Personen rekonstruiert werden. Dabei müssen auch die spezifischen Erregereigenschaften wie Virulenz (Maß der krankmachenden Erregereigenschaften), Tenazität (Zähigkeit des Erregers), infektiöse Dosis, Übertragungswege und Vermehrungsverhalten berücksichtigt werden. Hierzu muss wiederum das Personal, die Patienten, die immobilen (Räume und Oberflächen) und mobilen Objekte als Reservoir des Erregers betrachtet werden.

Während eines akuten Infektionsgeschehens ist es nahezu ausgeschlossen, eine zeitnahe angemessene und vollständige Information zum Geschehen über eine Befragung oder anderweitig manuelle Recherche zu erhalten. Hier kann nur durch eine Retrospektive eine aktuelle Handlungsoption abgeleitet werden. Besser aufgestellt ist man, wenn bereits relevante Kontaktdaten als aufgezeichnete Bewegungsprofile vorliegen. Auf dieser Basis kann man erregerspezifische Modellierungen durchführen, um ggf. bereits

stattgefundene „Infektions-Risiken“ für Personen zu errechnen, die noch keine Krankheitssymptome zeigen. Diese wurden evtl. noch nicht als infiziert bzw. als möglicherweise infektiös erkannt. Gegenüber einem klassischen Screening-Verfahren wird an diese Modellierung der Anspruch gestellt, dass die wahrscheinlichsten Infektionsträger und –verbreiter mit dieser Methode schneller und auch preiswerter identifiziert werden können.

Mit einem Beispiel, dem Ausbruch eines hochinfektiösen Norovirus (Auslöser für Magen-darm-Erkrankungen) in einer entsprechenden Kontaminationslandschaft, kann dieses Verfahren der GIS-unterstützten raum-zeitlichen Analyse von Kontaktmustern verdeutlicht werden (Kistemann et al. 2009). Ausgangspunkt für die Anwendung dieser Technologie ist die Erkenntnis über ein bestimmtes Potential für eine unkontrollierte Ausbreitung von Erregern durch die Diagnose einer krankenhaushygienisch relevanten Infektionskrankheit. Dies ist in diesem Beispielfall bei einer mit Norovirus infizierten Person gegeben. Ist diese Person diagnostiziert und damit identifiziert, muss je nach Entwicklung der Krankheit davon ausgegangen werden, dass dieser Patient bereits eine bestimmte Zeit infektiös war und zuvor schon andere Menschen im Krankenhaus infiziert hat. Diese müssen ihrerseits auch noch nicht symptomatisch sein. Nun wird aus dem zuvor aufgezeichneten Bewegungsprofil des Primärinfizierten eine Kontaminationslandschaft errechnet. Diese berücksichtigt den raum-zeitlichen Verlauf des Infizierten sowie die erregerspezifischen Merkmale wie z. B. die Überlebenswahrscheinlichkeit und die Übertragungswege des Erregers.

Nun werden alle übrigen Bewegungsprofile, die sich im relevanten Zeitraum dort stattgefunden haben, in der virtuellen und temporal animierten Kontaminationslandschaft überlagert und ausgewertet. Dabei werden die Bewegungsprofile aller anderen Personen ggf. rechnerisch ebenfalls mit einem Infektionspotential berechnet. Durch die Überlagerungen der Bewegungsprofile lässt sich ermitteln, wer z. B. zeitlich nach dem Primärinfizierten (Patient 1) eine bestimmtes WC besucht und somit potentiell infiziert hat.

Dieser Nachnutzer des WC, auch potentieller Rezipient genannt, kann nun identifiziert und anschließend isoliert werden, bevor er sich als extremer **Streuherd** oder so-

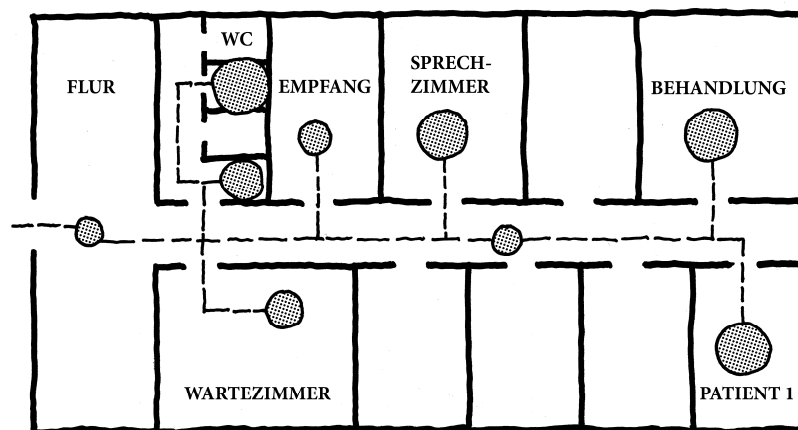


Abbildung 39: Bewegungsprofil eines infektiösen Patienten (Patient 1) und entstehende Kontaminationslandschaft (in Anlehnung an Kistemann et al. 2009)

genannter **Spreader** des hochinfektösen Norovirus durch eigene Brechdurchfälle entwickelt hat. Zusätzlich ist es hierdurch möglich, den Rezipienten einer zeitnahen Diagnose zu unterziehen, die eine schnellere Behandlung, bevor sich das Krankheitsbild voll entwickelt hat, ermöglicht. Des Weiteren kann die entsprechende WC-Anlage identifiziert und desinfiziert werden.

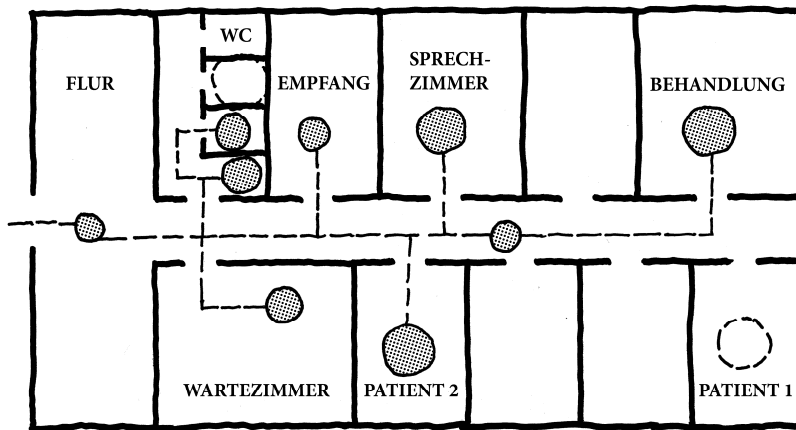


Abbildung 40: Bewegungsprofil eines potentiellen Rezipienten (Patient 2) durch die Kontaminationslandschaft (in Anlehnung an Kistemann et al. 2009)

Mit einer entsprechenden erweiterten Modellierung ist es auch möglich, die unterschiedlichen Infektionswege in dieses System zu implementieren. Dies können insbesondere die Übertragungswege der Tröpfchen- und Schmierinfektionen sein. Im Ergebnis dieser Modellierung bekommt man eine Liste der

am wahrscheinlichsten Infizierten. Diese potentiell Infizierten sollten dann einer weiteren Untersuchung zugeführt bzw. gleich isoliert werden. Bestimmte Personen sind im Krankenhaus aufgrund ihrer Funktion einem höheren Risiko von Infektionen ausgesetzt. Auch diese Informationen können bei der Auswahl der wichtigsten Personen zur effizienten Unterbrechung der Infektionskette berücksichtigt werden. Durch ein iteratives Durchlaufen der Berechnungen in diesem System können die zunächst als Risiko-Personen (potentielle Rezipienten) dann im zweiten Durchlauf als Ausgangs-Infizierte betrachtet werden.

Entscheidendes Endprodukt im Anschluss an die Modellierung von Kontaminationslandschaften der raum-zeitlichen Kontaktmuster unter Zuhilfenahme von GIS-Technologien im Krankenhaus ist eine qualifizierte To-Do-Liste, die eine plausible Abfolge der vorzunehmenden Kontrollmaßnahmen und Untersuchungen auflistet. Hierüber erfolgt der effiziente Eingriff in die Infektionskette gezielt und personenbezogen. Dies stellt einen wesentlichen Unterschied zu herkömmlichen Handlungsoptionen dar, die eventuell wichtige Spreader übersehen und den Kreis der potentiell Betroffenen entweder zu weit, und damit zu langsam und aufwändig, oder zu eng, und damit ohne Effekt, zieht.

*

Die in diesem Kapitel beschriebenen Möglichkeiten von elektronischen Kartierungswerkzeugen zeigen, dass sowohl die Aufklärung von Ausbrüchen in medizinischen Einrichtungen wie auch die Überwachung von nosokomialen Infektionen von der GIS-Technologie erheblich profitieren könnte. Die bestehenden Vorbehalte auf Seiten der

Datenschutzbeauftragten lassen jedoch zurzeit die Implementierung der beschriebenen Systeme in deutschen Kliniken kaum zu. Weitere Forschungen, die die Effizienz der Unterbrechung von Infektionsketten mit der Unterstützung der GIS-Technologie weiter herausarbeiten, könnten ein schrittweises Umdenken von Seiten des Datenschutzes zu Gunsten der gesundheitlichen gegenüber der datenschutztechnischen Patientensicherheit nach sich ziehen.

4. Bauliche Infektionspräventionsstrategie

Die vorangegangenen Kapitel haben gezeigt, dass die wissenschaftlichen Themenfelder, Methoden und Lösungsansätze bei der Infektionsprävention im Kontext mit baulichen Maßnahmen extrem vielfältig sind und auf unterschiedlichsten Betrachtungsebenen stattfinden. Das Kriterium der Komplexität stellt bei der Problemlösung die höchste Hürde dar. Im Gegensatz zu einem einfachen Problem, bei dem eine bekannte singuläre Lücke im Handlungsplan geschlossen werden muss, gilt es bei der baulichen Infektionsprävention eine Vielzahl an teilweise unscharf definierten Lücken im Handlungsverlauf zu füllen. Diese Lücken tun sich teilweise sogar erst im Problemlösungsprozess auf. Bei komplexen Problemthemen ist es häufig nicht einfach zu erkennen, ob die gewählte Lösungsstrategie tatsächlich zielführend ist. Es müssen daher zahlreiche Ansätze und Optionen angedacht werden, da die Gefahr eine Lücke übersehen oder nicht vollständig verschlossen zu haben, stets präsent ist. Daher kann die Antwort auf die Herausforderung der baulichen Infektionsprävention nicht in der einen singulär durchzuführenden Handlung bestehen, sondern muss ein Bündel an Maßnahmen sein.

4.1 Kombinierte Multi-Skalen-Barrieren-Strategie

Der komplexen Herausforderung der baulichen Infektionsprävention kann nur mit einem kombinierten Multi-Skalen-Barrieren-Ansatz begegnet werden. **Kombiniert** bezeichnet in diesem Zusammenhang die intersektorale Herangehensweise bei der Entwicklung transsektoraler Lösungsstrategien. **Multi-Skalen** bedeutet, dass der Problemraum auf unterschiedlichsten Betrachtungsebenen und –größen vom Detail der Oberflächenzusammensetzung über das Gebäude mit seinem Layout und den Prozessen bis hin zur Meta-Gesamtbetrachtung der Planungsprozessoptimierung optimiert werden muss. **Barrieren** sind in diesem Zusammenhang die Maßnahmen zur Unterbrechung der Infektionskette oder im Umkehrschluss, die Kette erst gar nicht zustande kommen zu lassen. Die Barrieren nehmen dabei eine Komponente aus der Gleichung von Infektionskette = Umwelt/Raum + Erreger + Wirt + Weg heraus, was die Kette unvollständig und damit wirkungslos macht.

Im Folgenden sollen daher Teillösungskomponenten aufgezeigt werden, mit denen ein kombinierter Multi-Skalen-Barrieren-Ansatz möglich ist. Die **Optimierung ausgesuchter Baukomponenten** bildet dazu die Grundlage (s. Kap. 4.2). Sie beschreibt die Komponenten der Kombination aus **bautechnisch-konstruktiver Weiterentwicklung** und **baufunktional-prozessualer Optimierung**. Beide Bereiche können nur im Verbund betrachtet wirksam sein. So kann ohne eine Analyse der Prozesse keine opti-

male Verortung der weiterentwickelten Materialien geschehen. Anders herum betrachtet ist die Prozessoptimierung schwieriger zu realisieren, wenn diese ohne die Abstimmung mit den entsprechenden Oberflächen erfolgen muss. Auch die baulichen Barrieren finden auf unterschiedlichen Skalen bzw. Größenordnungen vom Detail bis zur Gesamtbetrachtung statt. Die Optimierung der Baukomponenten zur Infektionsprävention soll durch die **Entwicklung neuer transsektoraler Methoden** vorangetrieben werden.

Zweites Standbein des kombinierten Multi-Skalen-Barrieren-Ansatzes ist die **Weiterentwicklung der Metabetrachtung** (s. Kap. 4.3). Hierbei wird die **Optimierung der Planungssystematik** im Besonderen der frühen Planungsphasen und ihre Einbettung von Experten und Wissen beschrieben. In diesem Zusammenhang wird die Implementierung der Systematik in die Bauwerksdatenmodellierung (BIM) angedacht. Zur besseren Orientierung für Planer im komplexen Themenfeld der baulichen Infektionsprävention wird die **Entwicklung einer Klassifikation** für alle Gebäudetypologien vorgestellt.

Im letzten Schritt werden **bereits entwickelte Forschungsansätze** (s. Kap. 4.4) vorgestellt, die zeitgleich mit der Erstellung der vorgelegten Arbeit vom Verfasser mit entwickelt wurden. Diese sollen die Möglichkeiten im Bereich eines kombinierten Multi-Skalen-Barrieren-Ansatzes aufzeigen.

4.2 Optimierung ausgesuchter Baukomponenten

Im Verlauf der vorangegangenen Kapitel wurden aus unterschiedlichsten Quellen neue potentielle Ansätze zur Optimierung der Baukomponenten herausgearbeitet. Diese ausgesuchten Komponenten werden hier aufgrund ihres Potentials für die Infektionsprävention dargestellt für den Bereich der bautechnisch-konstruktiven Gebäude-Komponenten gestaffelt nach Material und Oberflächen, Gebäudetechnik und ihrer konstruktiven Integration. Des Weiteren in der Weiterentwicklung der baufunktional-prozessualen Baukomponenten mit den Bereichen der ablaufprozessoptimierten Planung, neuen prozessualen Barriereformen und dem Umgang mit dem grundsätzlichen Verständnis der Wechselwirkung von Raumnutzungsverhalten und Infektionspotential. Die Entwicklung transsektoraler Methoden aus den Bereichen des computergestützten Modellierens, der Computational Social Science, der Visualisierung der Ablaufverfolgung etc. sollen den transsektoralen Ansatz der baulichen Infektionsstrategie verdeutlichen.

4.2.1 Weiterentwicklung bautechnisch-konstruktiver Gebäude-Komponenten

4.2.1.1 Optimierung von Material und Oberflächen im Kontext

Neben der Weiterentwicklung der Oberflächenqualität der einzelnen Materialkomponenten in Hinblick auf Alltagstauglichkeit (Stoßfestigkeit etc.) sowie etablierten Reinigungs- und Desinfektionsverfahren, muss der **baukonstruktive Ansatz im Verbund der Materialien** weiterverfolgt werden. Schwachstelle ist zumeist nicht das einzelne Material selbst, sondern seine konstruktive Fügung an das Träger- oder Nachbarmaterial. Der baukonstruktive Ansatz muss dabei sowohl bei der Materialentwicklung als auch in der gewerkeübergreifenden Planung erfolgen.

Neue **Desinfektions- und Dekontaminationsverfahren** müssen **in Abstimmung mit der Materialforschung** weiterentwickelt und etabliert werden. Da das Hauptreinigungsverfahren z.Zt. immer noch die klassische Scheuer- und Wischdesinfektion darstellt, werden entsprechende Vorgaben zur Oberflächenbeschaffenheit bei der Materialentwicklung nahezu ausschließlich dahingehend weiterentwickelt. Als darüberhinausgehende Desinfektions- und Dekontaminationsverfahren werden hier die H_2O_2 -Vernebelung oder UV-Bestrahlung genannt. Diese Verfahren werden immer noch unzureichend berücksichtigt und müssen stärker als Teil der baulichen Infektionsprävention in Zusammenspiel mit der Oberflächen- bzw. Materialentwicklung vorangebracht werden.

Für hygienesensible Bereiche müssen **neue Oberflächenbeschichtungsverfahren** weiterentwickelt werden. Dabei ist zu überprüfen, in wie weit antibakterielle oder antimikrobielle Beschichtungen und ihre **keimreduzierende Wirkung** sinnvoll bei der baulichen Infektionsprävention einzusetzen sind. Gleichfalls muss die reduzierte Besiedlungsmöglichkeit bzw. **geminderte bakterielle Adhäsion** / Haftwirkung aufgrund

neuer oberflächenmorphologischer Charakteristika der Beschichtungen weiterverfolgt werden.

4.2.1.2 Weiterentwicklung der Gebäudetechnik

Im Bereich der Lüftungstechnik wird die Effektivität von LAF-Systemen (Laminar Air Flow) kontrovers diskutiert. Trotzdem muss die Möglichkeit von **laminaren Strömungen** zur Kontrolle von Infektionsübertragungswegen weiter erforscht werden. Der **Einsatz eines kontrollierten Luftschleiers zur Barrierenwirkung** zwischen unreinen und reinen Bereichen muss überprüft werden. Hierbei könnten die schwer zu kalkulierbaren Parameter der Strömungsgeschwindigkeit und Turbulenzen, die zur Störung der laminaren Strömung führen, besser in der nahezu zweidimensionalen Schleierströmungsführung abgestimmt werden.

Die **Vernebelungsverfahren mit Wasserstoffperoxid** müssen für den Bereich der **Raumdesinfektion**, d. h. für die Luft- und Oberflächendesinfektion, weiterentwickelt und etabliert werden. In die Gebäudetechnik integrierte Lösungen könnten damit z. B. in infektionssensiblen Bereichen wie einer Sonderisolierstation bis hin zur Basishygiene eines Patientenzimmers oder thematisch anders gelagerter Räume zu einem neuen **standardisierten Desinfektionsverfahren** gegenüber der klassischen Wischdesinfektion eingesetzt werden.

Aufgrund ihrer besonderen Eigenschaft, keine mutationsbedingten Resistenzen gegenüber Antibiotika entwickeln zu können, muss die **UV-Desinfektion** weiter wiederbelebt werden. Trotz ihrer physikalischen Limitationen wie die geometrisch betrachtet lineare Strahlung und ihrer oberflächenbeeinträchtigenden Eigenschaft wie z. B. der Versprödung muss die UV-Desinfektion bei der baulichen Infektionsprävention Berücksichtigung finden. Hier sollte eher in der Materialentwicklung ein abgestimmtes Verfahren im Einklang mit diesem Desinfektionsverfahren vorangetrieben werden.

Die **Weiterentwicklung von Filtrationsverfahren** muss weiterverfolgt werden, im Besonderen der Einsatz von Mikrofiltern. Diese Mikrofiltertechnologie könnte eine Grundversorgung mit sauberem Wasser aufgrund ihres technisch einfachen Verfahrens gerade in Entwicklungsländern sicherstellen.

4.2.1.3 Förderung der konstruktiven Integration der Gebäudetechnik-Komponenten

Die Gebäudetechnikkomponenten müssen als integraler Bestandteil des gebauten Raumes geplant werden. Ihre konstruktive Integration wird als übergeordnetes Weiterentwicklungspotential gesehen. Die Komponenten der Gebäudetechnik dürfen nicht mehr als *add-on* bzw. additives Technik-Anhängsel am Ende der Planung sozusagen stiefmütterlich *on Top* geplant werden.

Auf Grundlage baufunktional-prozessualer Analysen müssen Hygienekomponenten integral als Teil des Raumes geplant und damit wie selbstverständlich benutzbar gemacht werden. Beispielhaft kann hier die Integration von Desinfektionsmittelspendern

oder technische Komponenten wie Scanner oder Kameras zum Tracking und Tracing der Ablaufverfolgung weiterentwickelt werden.

4.2.2 Weiterentwicklung baufunktional-prozessualer Planungs-Komponenten

4.2.2.1 Optimierung der Ablaufprozesse durch neue Planungsansätze

Zurzeit finden nahezu alle baufunktional-prozessualen Methoden der Infektionsprävention zur Distanzwahrung, Wegeentflechtung, Separation und Isolation in räumlich zugangskontrollierten Bereichen wie dem Laborbau, besonderen Bereichen des Gesundheitsbaus, der Lebensmittelproduktion oder Großküchen statt. Die Barrierewirkung wird dabei durch eine Schwarz-Weiß- oder Rot-Gelb-Grün-Trennung mithilfe von Schleusen bis hin zu Quarantänemaßnahmen realisiert.

Eine große Herausforderung stellt dem gegenüber die Reduzierung des Infektionsrisikos im Bereich der öffentlichen Bauten dar. Die Entflechtung von Wegeüberlagerungen und die gerichtete Wegeführung gilt es hier anzustreben. **Neue baufunktional-prozessuale Barriereformen** müssen in diesem Bereich entwickelt werden. Diese könnten das Infektionsrisiko in öffentlichen Bereichen mit hohem wechselndem Personenaufkommen wie bei Bauten des Lernens, des Nah- und Fernverkehrs sowie des Versorgungs- und Freizeitkonsums reduzieren. Dabei muss überprüft werden, in wie weit vorhandene Übergangsformen bzw. Schleusen wie z. B. Zugangskontrollen bzw. Eingänge im Nahverkehr, in Stadien oder Museen dazu genutzt werden könnten, um an diesen Stellen infektionspräventive Maßnahmen zu etablieren.

4.2.2.2 Infektionspräventive Bauplanung auf Grundlage des menschlichen Raumnutzungsverhaltens

Will man dem Menschen eine möglichst kontaktlose distanzwahrende Raumnutzung im Sinne der baulichen Infektionsprävention ermöglichen, muss man zunächst das Bewegungsverhalten des Menschen im Raum verstehen.

4.2.2.2.1 Besseres Verständnis der Wechselwirkung von Raumnutzungsverhalten und Infektionspotential durch interdisziplinäre Studiensettings

Die interdisziplinären Arbeitsgemeinschaften müssen über alle Wissenschaftsdisziplinen verfügen, die das **Verständnis** von **Infektionsübertragung, Raum** und **Sozialverhalten** beinhalten. Über das Wissen von Epidemiologen und Planern hinaus sind hier die Erkenntnisse der Anthropologie, Soziologie, Psychologie und der Gesundheitsgeografie für dieses Verständnis erkenntnisgewinnend.

4.2.2.2 Nutzung anthropologischer Erkenntnisse zur optimierten Raumorientierung

Die Anthropologie (s. Kap. 3.3.1) hilft dabei, das Verhalten des Menschen zu seiner Umwelt zu erklären. Mit ihren evolutionären Theorien erklärt sie unsere heutigen Bewegungsmuster und Präferenzen für bestimmte Raumsituationen. Dieses Verhalten stammt aus einer Zeit, in der das Überleben durch eine schnelle räumliche Orientierung und Bewertung der Lage überlebensnotwendig war. Dabei war die **Verarbeitung von zahlreichen gleichzeitigen visuellen Informationen** entscheidend. Allerdings kann der Mensch die große Fülle an Informationen nicht vollständig erfassen und muss diese in Einzelinformationen zerlegen und filtern. Der Mensch fokussiert sich daher auf einzelne spezifische Elemente seiner Umgebung. Diese gilt es herauszufinden und für die bauliche Infektionsprävention im Sinne der Raumorientierung zu nutzen.

4.2.2.3 Optimierte Planung durch Berücksichtigung unterschiedlicher kultureller Raumverständnisse

In der Architektursoziologie (s. Kap. 3.3.2) wird die **räumliche Distanz**, auch geprägt durch die individuelle Bewegung im Raum, als Teil jeglicher sozialen Interaktion beschrieben. Dabei wird der Raum als **Strukturierungselement** dieser sozialen Interaktion aufgefasst. Eine besondere Bedeutung kommt hierbei den unterschiedlichen kulturellen Hintergründen der handelnden Akteure zu, die sich in den sogenannten Raumnutzungsmustern ausdrücken. Dieser Zusammenhang von unterschiedlichem kulturellem Raumverständnis wird auch mit **Proxemik im Kulturvergleich** beschrieben. Dabei werden interpersonelle Distanzen unterschiedlich wahrgenommen. Aus anthropologisch-soziologischer Betrachtung wird dieses unterschiedliche Verhalten im Raum bzw. im Umgang mit der **persönlichen Distanz** durch ein sogenanntes Territorialverhalten beschrieben. So wird z. B. in Europa oder Nordamerika im öffentlichen Raum eine für die Infektionsprävention günstige zwischenmenschliche kontaktlose Distanz gehalten. In Bereichen des Orients oder Asiens schrumpfen diese Distanzen bis hin zum Körperkontakt aufgrund unterschiedlicher kultureller Hintergründe.

4.2.2.4 Weiterentwicklung von Behavior Settings zur Infektionsprävention

Ein weiterer Punkt der Architektursoziologie sind die von Roger Barker beschriebenen Behavior Settings, die die Wechselbeziehung von sozialem Verhalten und gebauter Umwelt beschreiben (s. Kap. 3.3.2). Die Studien von Barker haben gezeigt, dass wiederkehrende Verhaltensmuster durch bestimmte Umweltsituationen, in unserem Sinne Raumsituationen, hervorgerufen werden. Barker bezeichnet diese als *standing patterns of behavior* (verfestigte Verhaltensmuster). Bestimmte Behavior Settings rufen ein entsprechendes Verhalten hervor, die aufgrund individualpsychologischer Faktoren wenig Abweichung im Verhalten erlauben, wie z. B. die eher reduzierte und leise Konversation

in Wartezimmern von Praxen. Die Möglichkeit der Entwicklung von Behavior Settings im Sinne einer infektionspräventiven Raumnutzung muss daher geprüft werden.

4.2.2.2.5 Bessere Identifikation von Funktionen durch den Einsatz von Semiotik

Die von Umberto Eco in seinem Werk *Einführung in die Semiotik* (Eco und Trabandt 1972) beschriebene **Semiotik der Architektur** sollten im Sinne einer infektionspräventiven Orientierung eingesetzt werden. Seine definierten *Codes*, die die Wechselbeziehung von Ausdrucks-Elementen zu Inhalts-Elementen regeln, dienen dabei der Verständnisklärung und fördern damit die bessere Orientierung.

4.2.2.2.6 Verbesserte Orientierung durch Piktogramme

Die Zeichensprache der Piktogramme ist eine **universelle Methode** im Mensch-Raum-Verhalten. Zur besseren Orientierung des Menschen im Raum und Zuweisung von Funktionsbestimmung entsprechender Gebäude ermöglicht sie eine **rein visuelle Kommunikation**. Dabei ist sie losgelöst von jeglichen Kultur-, Sprach- und Bildungsstandards und damit weltweit verständlich.

4.2.2.2.7 Optimierte Planung und Gestaltung von Räumen bzw. Distanzen unter architekturpsychologischen Aspekten

Die Wirkmechanismen der unterschiedlichen Distanzen im Sinne der Architekturpsychologie (s. Kap. 3.3.3) müssen für die Infektionsprävention nutzbar gemacht werden. Das Untersuchen und Gestalten von Zwischenräumen bzw. Distanzen, ob nun zwischen Objekten (IOD), zwischen Menschen und Objekten (POD) oder bei der interpersonellen Distanz (IPD) sollte für die bauliche Infektionsprävention weiterentwickelt werden.

4.2.2.2.8 Nutzung der Erkenntnisse der Gruppendynamik und Einsatz psychologischer Barrieren zur Planungsoptimierung

Die **Feldtheorie nach Kurt Lewin** ist Ausgangspunkt vieler psychologischer Theorien. Dabei wird der Lebensraum in einzelne Regionen aufgeteilt, die für den Menschen unterschiedlich starke **psychologische Barrieren** besitzen. Die Einsatzfähigkeit dieser Barrieren muss für die bauliche Infektionsprävention herausgearbeitet werden. Die Feldtheorie ist ein wichtiger Vorreiter im Bereich der kognitiven Psychologie durch ihre Herausarbeitung der Situationswahrnehmung und ihrer Bewertung durch die Individualität des Menschen. Die in diesem Zusammenhang wichtigen Erkenntnisse der Gruppenpsychologie und damit auch der **Gruppendynamik** sollten für die bauliche Infektionsprävention aufgegriffen und in zukünftigen Studiensettings implementiert werden.

4.2.2.2.9 Planerische Entschärfung von Crowding-Bereichen durch architekturpsychologische Erkenntnisse

Besonders im Gedränge, dem Aufkommen von vielen Menschen auf kleinem Raum, ist die Gefahr der Infektionsübertragung aufgrund der kurzen interpersonellen Distanz besonders hoch. Das Verständnis zur Entschärfung dieser sogenannten Crowding-Situationen muss daher weiter erforscht und für die bauliche Infektionsprävention abgeleitet werden.

Empirische Studien konnten bereits in Teilen zeigen, wie man mit baulichen Maßnahmen auf Crowding-Situationen reagieren kann (s. Kap. 3.3.3). So konnte eine Studie herausarbeiten, dass in Crowding-Bereichen klare Orientierungshinweise notwendig sind. Weitere Erkenntnisse für den Einsatz in der Infektionsprävention müssen in zukünftigen Forschungsprojekten erarbeitet werden. Fragen zu Raumproportionen, Flexibilität und Ausstattung dieser Bereiche müssen dazu beitragen, Crowding-Situationen erst gar nicht entstehen zu lassen oder frühestmöglich zu entschärfen. Als beispielhafte Crowding-Bereiche können hier die Warteschlangen vor Konzerteinlässen oder dem Security-Check im Flughafen sowie die Aufenthaltsbereiche im öffentlichen Nah- und Fernverkehr genannt werden.

4.2.2.2.10 Weiterentwicklung des planerischen Ansatzes zur Unterstützung des kognitiven Kartierens zur Orientierung und Distanzwahrung

Der Planer muss die gebaute Umwelt für den Nutzer so gestalten, dass dieser sich selbst im Raum verorten und orientieren kann. Die gezeigten fünf Elementen und zehn Eigenschaften nach Lynch (s. Kap. 3.3.3) dürfen nicht für sich isoliert betrachtet werden. Erst die richtige Kombination und Vielzahl der Elemente und Eigenschaften geben jedem Bereich des gebauten Raumes seine ganz eigene Identität. Diese Identität bestimmt eine präzise Verortung und erleichtert dem Nutzer seine Orientierung im Raum. Diese Verortung und damit Orientierung im Raum wird die distanzwahrende und kontaktlose Raumnutzung im Sinne der baulichen Infektionsprävention unterstützen. Aus diesem Grund müssen die **Entwurfsprinzipien** nach Lynch (Lynch 1960) Bestandteil jeder infektionspräventiven Planung werden.

4.2.2.2.11 Nutzung des raumdynamischen Ansatzes der Gesundheitsgeografie für die Planungsoptimierung

Die Gesundheitsgeografie verfügt auf unterschiedlichsten Maßstäben und Ebenen über geeignete Modelle, Konzepte und Methoden zur Analyse und Präsentation im komplexen Gefüge von Risikofaktoren und Abhängigkeiten der Infektionen (s. Kap. 3.2.2). Bezogen auf die Architektur ist die räumliche Dimension hierbei zentrale Stärke der Gesundheitsgeografie. Diese Möglichkeiten müssen für die bauliche Infektionsprävention

in transsektoralen Forschungsansätzen weiterentwickelt werden. Gerade der methodische, raumdynamische Ansatz durch den Einsatz von geografischen Informationssystemen (GIS) muss hierbei vorangetrieben werden.

4.2.3 Entwicklung transsektoraler Methoden

4.2.3.1 Integrale Betrachtung der Ablaufverfolgung unter baulichen Aspekten

In Kapitel 3.4.3 wurde gezeigt, dass Warenketten im ungünstigsten Fall mit Infektionsketten gleichgesetzt werden können. Dabei ist es zur Eindämmung einer lebensmittelassoziierten Epidemie überaus hilfreich, die ursprüngliche Kontaminationsquelle und ihren zurückgelegten Weg entlang der Warenketten identifizieren zu können. In diesem Zusammenhang wird der Begriff **Tracking** für die Überwachung des eigentlichen Trägers der Infektion und **Tracing** für das Aufspüren der Kontaminationskette bzw. -weges verwendet. Im Zuge der Infektionsprävention wurden Software-Applikationen entwickelt, die ein integriertes Datenmanagement, Analysen und **Visualisierung** von Warenketten ermöglichen. Hiermit können **Wahrscheinlichkeiten zum Ausbruchsgeschehen** geschätzt werden, **Simulationen von Kreuzkontaminationen** durchgeführt und **räumliche Zusammenhänge** dargestellt werden.

Die Erkenntnisse der Ablaufverfolgung von Warenketten muss auch auf andere Infektionsketten, wie der des Menschen, abgeleitet werden. Das *Tracken* (Nachverfolgen) und *Tracen* (Aufspüren) von Personen im Sinne einer Infektionsprävention ist in Deutschland flächendeckend aufgrund des Datenschutzes z.Zt. unmöglich. Zu prüfen wäre dieser Einsatz in räumlich klar definierten Bereichen wie z. B. auf einer Krankenhausstation. Die bautechnisch-konstruktive Implementierung der notwendigen Tracking- und Tracing-Komponenten ist ein darauf aufbauender Ansatz. Die bereits bestehenden Tracing-Software-Möglichkeiten müssten für die Erfassung der räumlichen Zusammenhänge je nach Einsatzbereich eine entsprechend feine Skalierung aufweisen.

4.2.3.2 Weiterentwicklung von bestehenden Methoden in der Lebensmittelindustrie auf andere Gebäudetypologien

Die bestehende **Produktschutz-Checkliste** des BfR (s. Kap. 3.4.3), die ursprünglich entwickelt wurde, um präventiv die Gefahr für eine absichtliche Kontamination in der Lebensmittelkette zu minimieren, kann in der Praxis mit ihren Fragestellungen effektiv helfen, die unbeabsichtigte Kontamination in anderen Gebäudetypologien zu reduzieren.

Teile des Fragenkatalogs lassen sich ohne größere Anpassungen übertragen, wie etwa die regelmäßigen Defizitanalysen der vulnerablen Punkte der Prozessabläufe oder Kommunikationsmaßnahmen im Krisenfall, ebenso zu den baulichen Aspekten wie

die autorisierte Zutrittsregelung, Notfallsysteme, Produktions-, An- und Ablieferungsbereiche, Lagerräume, Lüftungsanlagen etc., die schlussendlich über einen **Produktschutzindex** berechnet werden.

4.2.3.3 Kombination der Verhaltensökonomik und Bauplanung

Die Methode, das Verhalten von Personen auf eine vorherbestimmte Art und Weise zu beeinflussen, wurde von Sunstein und Thaler als sogenannter **Nudge** etabliert (s. Kap. 3.3.5). Dieser Begriff geht auf die Verhaltensökonomik zurück, die ebenfalls durch die Arbeiten des Psychologen Kurt Lewin geprägt ist.

4.2.3.3.1 Beeinflussung der Nutzer in ihrer Verhaltensökonomik durch gebaute Nudges

Das Handeln von Menschen ist fehleranfällig, daher müssen sie sich in einem System bzw. Raumgefüge bewegen, das eine hohe Fehlertoleranz zulässt. Im Sinne der baulichen Infektionsprävention muss deshalb die Möglichkeit der Implementierung von Nudges in Form von **Standards**, **Voreinstellungen** und **Zwangsfunktion** erforscht und praxistauglich entwickelt werden. Standards können etabliert werden, wie z. B. für Türgriffe, denen man ihre Aufschwingrichtung ablesen kann. Standards können auch für wiederkehrende Layouts bzw. Musterlösungen bestimmter Bereiche zur schnelleren Orientierung darstellen. Piktogramme sind ebensolche Standards. Voreinstellungen können im Bereich des Bauens z. B. die geführte Laufrichtung der Nutzer oder Zuweisung von Flächen durch entsprechende Planung sein. Eine Zwangsfunktion könnte z. B. die automatisierte Türöffnung eines Patientenzimmers nach erfolgter Händedesinfektion sein. Mithilfe von Nudges können auf diese Weise die Bewegungsmuster von Menschen beeinflusst bzw. *gestupst* werden, ob nun in Bezug auf die Distanz oder im Bereich der Prozesse.

4.2.3.4 Computergestütztes Modellieren unter baufunktional-prozessualen Parametern

4.2.3.4.1 Datenanreicherung

Jede Art von computergestütztem Modell muss mit Daten angereichert werden, um eine gewünschte Simulation durchführen zu können. Die Quellen können dabei sehr unterschiedlicher Herkunft und Skalierung sein. Die **computergestützten Sozialwissenschaften** (Computational Social Science) konzentrieren sich bei ihren Sozialerhebungen auf die Informationsverarbeitung mithilfe moderner Informationstechnologie (s. Kap. 3.3.4). Ihre Berechnungsaufgaben beinhalten die Analyse von traditionellen Medieninhalten, **sozialgeografischen Systemen**, **Social Media Inhalten** und **sozialen Netzwerken**.

Die Big-Data-Analyse der digitalen Epidemiologie erfasst auf ähnliche Weise das Verhalten, die Mobilität sowie die Interessen des Menschen anhand seiner digital vorhandenen Daten im Netz. Diese Monitorisierung wird auch **social tracking** genannt, die vermenschlichte Variante des *Aufspüren* und *Verfolgen* der Warenkette (s. Kap. 3.4.3).

Die allgegenwärtige Erfassung von Informationen durch die globale Vernetzung von mobilen Geräten sowie die indirekte Analyse von Netzaktivitäten auf einer Metaebene stellt eine überaus große Datenquelle dar. Bei der Auswertung der Daten ist die Qualität der Rohdaten, ihre Analysen und entsprechenden Aussagen kritisch zu betrachten. Ein großes Potential ist dennoch vorhanden, wenn die entsprechenden Rahmenbedingungen angemessen berücksichtigt werden.

Zur Datenanreicherung der Simulationsmodelle müssen weitere, bereits bestehende Quellen erschlossen bzw. entsprechend interpretiert werden. Die **Analyse vorhandener Datenbankinformationen** zur Informationsbeschaffung muss unter datenschutzrechtlichen Prämissen erfolgen, um eine vollständige Nutzung zur spatio-temporalen bzw. **räumlich-zeitlichen Auflösung der Daten** zu ermöglichen. Diese Datenbanken mit Informationen zur räumlichen Analyse können dabei von globalen, regionalen bis hin zu lokalen Daten z. B. einer Krankenhausstation angereichert sein. Diese Daten könnten beispielhaft aus den Datenbanken der Krankenkassen generiert werden.

Bekannte Technologien müssen ebenfalls zur Anreicherung der Daten für die Simulationsmodelle herangezogen werden. Zur **GIS**-gestützten Auswertung von Bewegungsmustern können im lokalen Bereich die **RFID**- oder **bluetooth-Technologie** oder **Ultraschall** zum Einsatz kommen (s. Kap. 3.4.4). Zur Auswertung aller raum-zeitlichen Kontaktmuster einer solchen *Kontaminationslandschaft* können nicht nur Personen, sondern auch Räume sowie statische und bewegliche Objekte mit diesen Technologien ausgestattet werden.

Unbestritten bleibt, dass bei der Erhebung auf diese Weise gewonnener Daten, das Aufzeichnen von Bewegungsmustern aus datenschutzrechtlicher Sicht eine kritisch gesehene personenspezifische Vorratsdatenhaltung darstellt, auch wenn alle denkbaren Maßnahmen der Anonymisierung, Zugriffsbeschränkung und zeitnahen Datenvernichtung berücksichtigt werden. Zu diskutieren ist hier, in wie weit der Datenschutz den Gesundheitsschutz überwiegt.

Möchte man Daten erfassen ohne die Personen mit technischen Systemen auszustatten, wie die beschriebenen RFID-Chips, so kann man versuchen, bereits etablierte Systeme und ihre erfassten Daten für die räumlich-zeitliche Analyse zur Darstellung einer Kontaminationslandschaft neu zu interpretieren. So muss z. B. darüber nachgedacht werden, ob das Ticketsystem der Bahn und des Nahverkehrs anonymisierte Daten zu Bewegungsmusteranalyse bereitstellen kann.

4.2.3.4.2 Modelle und ihre Möglichkeiten für die bauliche Infektionsprävention

Häufig werden bei der räumlichen Simulation von Ausbreitungsmodellen **Multi-Agenten-Systeme** verwendet (s. Kap. 3.4). Dabei werden die aktiven Komponenten des zu simulierenden Systems *Agenten* genannt. Das Verhalten der Agenten kann einzeln spezifiziert werden. Die Spezifikationen können von Datenquellen angereichert werden. Dynamische Wechselwirkungen und zusammenhängende Phänomene können auf diese Weise im System nachgewiesen werden.

4.2.3.4.3 Personenstromsimulation zur infektionspräventiven Bewegungsmusteranalyse für die optimierte Bauplanung

Die Personenstromsimulation stellt eine effektive Methode zum Verständnis von Mensch, Distanz, Raum und Bewegung dar. Der fußläufige Bewegungsablauf wird hierbei auf der Grundlage mathematischer Modelle am Computer simuliert (s. Kap. 3.3.4). Diese neuen physikalischen Modellierungskonzepte wie z. B. die Beschreibung bzw. **Simulation der Selbstorganisationsphänomene in Fußgängergruppen** von Helbing sind für das Verständnis möglicher baulicher Infektionspräventionsstrategien im Bereich der bereits beschriebenen Inter-Personellen- bzw. Person-Objekt-Distanz hilfreich (Helbing 2013).

Für die Personenstromsimulation gibt es Regressionsmodelle, Warteschlangenmodelle, Routenwahlmodelle und viele mehr. Im Zusammenhang der hier schon öfter beschriebenen Feldtheorie von Kurt Lewin muss auf Dirk Helbings sozialen Kräftemodell hingewiesen werden. Als mathematische Spezifikation von **Lewins sozialer Feldtheorie** kann man **Helbings soziales Kräftemodell** verstehen. Mit diesem Modell kann besonders gut das Verhalten im Fußgängerverkehr beschrieben werden.

Das Modell gibt trotz seiner Einfachheit mit automatischen Verhaltensreaktionen viele beobachtete Phänomene nahezu realistisch wieder. Diese Beobachtungen werden als **Selbstorganisation kollektiver raum-zeitlicher Bewegungsmuster** beschrieben (Helbing 2013). Die Selbstorganisation resultiert aus den Wechselwirkungen der Fußgänger untereinander.

Eine realistische Nachbildung der Dynamik von Fußgängergruppen kann über entsprechenden Simulationsprogramme modelliert werden. Dabei lassen die Simulationsmodelle eine Berechnung von Bewertungsmaßen wie z. B. die Effizienz einer bestimmten Fußgängeranlage bzw. Situation zu. Diese Möglichkeit zur Verbesserung der Funktionalität muss für die Planungsoptimierung genutzt werden. Es muss daher in transsektoralen Studiensettings untersucht werden, in wie weit die Möglichkeit besteht, mit diesen Simulationen in z. B. Interventionsstudien bauliche Maßnahmen zu entwickeln, die die Nutzer hin zu **infektionspräventiven Bewegungsmustern** (z. B. größere Inter-Personelle- und Person-Objekt-Distanzen) leiten.

4.2.3.4.4 **Modellierung der baulichen Formoptimierung zur Selbstorganisation von Nutzern - Wegeentflechtung**

Die Möglichkeit zur Simulation mithilfe des sozialen Kräftenmodells stellt für den Bereich der baulichen Infektionsprävention eine sehr wertvolle Methode dar, da bereits zum Zeitpunkt der Gebäude-Planung auf dem Computer Optimierungen bestimmter Bereiche anhand der durchzuspielenden Modelle der Nutzerbewegungen vorgenommen werden können (s. Kap. 3.3.4). Dabei werden die räumliche Gestalt bzw. Anordnung der zu planenden Bereiche systematisch variiert. Diese Methode der **Formoptimierung** muss im Sinne der baulichen Infektionsprävention weiterentwickelt und in die Planung implementiert werden.

Bei der Erstellung der entsprechenden Modelle müssen entsprechende **Bewertungskriterien** für die Nutzungsqualität der zu planenden Bereiche definiert werden. Dabei ist die Leistungsfähigkeit der Ausgangspunkt der Kriterien. Weitere sind abhängig vom Nutzungszweck des zu planenden Bereiches sowie von der Nutzungssituation. So können diese Kriterien z. B. das Effizienzmaß als Kriterium für die Schnelligkeit bzw. Reibungslosigkeit, das Komfortmaß oder die Beeinflussungsstärke als das Maß für die Konzentration, die ein Mensch für eine kollisionsfreie Fortbewegung benötigt, sein.

Für zukünftige Simulationen zu **infektionsrelevanten Themenstellungen** müssen daher entsprechende Kriterien für diese Modelle definiert werden. Die Formoptimierung kann anschließend auf Grundlage dieser Bewertungskriterien durchgeführt werden. Die Simulationen müssen dabei für verschiedene Belastungssituationen gegebenenfalls wiederholt werden. Dabei können entsprechende Faktoren im Zuge der Optimierungsprozedur variiert werden. Diese Faktoren bzw. Größen können zum einen die räumlichen Dimensionen der zu planenden Bereiche sein wie z. B. Form der Räume, Ein- und Ausgänge, Korridore sowie die Anordnung der einzelnen Komponenten zueinander, sowie die jeweilige Funktion und der Zeitplan der entsprechenden Bereiche der Gebäude- und Raumnutzung.

Ebenfalls müssen bei zukünftigen Studiensettings diese Simulationen der Formoptimierung nicht nur während der Vor- bzw. Neuplanung von Gebäuden eingesetzt werden, sondern auch in Bestandsbauten zur Optimierung von Engpässen oder Problem-bereichen durch geeignete Änderungsmaßnahmen Verwendung finden.

4.2.3.4.5 **Nutzung der effektiven Distanz für ein erweitertes baufunktional-prozessuales Verständnis**

Zum besseren Verständnis geographischer Ausbreitungsgeschwindigkeiten von potentiellen Erregern hat Brockmann den Begriff der **effektiven Distanz** eingeführt (s. Kap. 3.4.2). Hierbei wird die konventionelle geographische Entfernung durch das effektive Entfernungsmaß ersetzt. Dieser neue Begriff der effektiven Distanz berücksichtigt also qualitativ stark verknüpfte Knoten bzw. Flughäfen gegenüber schwach gekoppelten Knoten. Herunterskaliert auf ein Gebäude oder Funktionsbereich sollte in zukünftigen

Studiensettings geprüft werden, ob diese effektive Distanz nicht auch auf z. B. hygiene-sensible Bereiche gegenüber weniger infektionsanfälligen Bereichen übertragen werden kann. Damit würde sich ein **erweitertes räumliches Bild einer Kontaminationslandschaft** ergeben. Ebenso könnte der Begriff der effektiven Distanz genutzt werden, um nicht die reale Distanz z. B. zwischen zwei Patienten in einem Zwei-Bett-Zimmer zu beschreiben, sondern deren effektive Distanz, die z. B. durch die Pflege-Prozesse des Personals beschrieben werden können. Durch die Beschreibung von effektiven Distanzen könnten die Zusammenhänge in Gebäuden besser visualisiert und nachvollzogen sowie anschließend entsprechend darauf reagiert werden.

4.2.3.4.6 **Nutzung von GIS-Technologie zur Modellierung einer Kontaminationslandschaft als Datengrundlagen für eine computersimulierte Planungsoptimierung**

Sogenannte **Mapping-Tools** sind im Einsatz moderner Geographischer Informationssysteme (GIS) elektronische Kartierungswerkzeuge, mit denen raumbezogene Daten auf entsprechenden Computersystemen verarbeitet, analysiert, gespeichert und schlussendlich visualisiert werden können (s. Kap. 3.4.4). Bei der Betrachtung der räumlichen Ausbreitung in der Epidemiologie müssen regelmäßig auch die zeitlichen Aspekte berücksichtigt werden. Aus diesem Grund sind Mapping-Tools, die **spatio-temporale Modelle** bei der Analyse epidemiologischer Fragestellungen berücksichtigen, vorteilhaft. Dabei werden Multi-Agenten-Simulationen verwendet, um einerseits Zusammenhänge zu begreifen, andererseits Theorien in einer virtuellen, kontrollierten Laborumgebung zu überprüfen. Hier müssen transsektorale Studiensettings ansetzen. Die virtuelle, kontrollierte Laborumgebung sollte für bauliche Interventionsstudien nutzbar gemacht werden.

Kistemann entwickelt den Begriff des InfektionsInfoSystems zur Beschreibung der Nutzung Geographischer Informationssysteme (GIS) für die Krankenhaushygiene (Kistemann et al. 2009). Dabei soll eine virtuelle und temporal animierte sogenannte **Kontaminationslandschaft** für eine spezifische Verknüpfung von Pathogenen und Primärinfizierten errechnet werden. Diese *Kontaminationslandschaft* wird zusätzlich mit Hilfe eines Real-Time-Location-Systems (RTLS) aufgebaut, das die Begegnungen und Aufenthalte aller Objekte und Personen zu individuell bestimmbaren Kontaminations- und Infektionsrisiken beinhaltet. Die serienreife Umsetzung des InfektionsInfoSystem scheiterte in der Vergangenheit in Deutschland an der Unvereinbarkeit mit dem Datenschutz. Die zukünftige **Datenerfassung** einer kontrollierten anonymisierten Studie nach diesem Vorbild könnte wertvolle Daten für den **Aufbau von Mikrosimulationsmodellen zur Formoptimierung** liefern. Dabei wird auch der Maßstab frei skalierbar sein.

4.2.3.4.7 **Entwicklung prospektiver Vorhersagen über die Verbreitung von Infektionen für den Einsatz zeitnaher baulicher Maßnahmen, wie z. B. Schleusen, Quarantänen oder Lüftungstechnik**

Nicht nur die retrospektive Aufdeckung von Infektionsketten mithilfe von GIS durch raum-zeitliche Kontaktmuster ist von Vorteil, sondern auch die prospektive Vorhersage der Infektionsverbreitung. Um ein akutes Infektionsgeschehen effizient eindämmen zu können, müssen die Kontrollmaßnahmen den zeitlichen Vorsprung des Krankheitserregers im Ablauf der Infektionskette aufholen. Um dies zu erreichen, müssen sehr zeitnah die übertragungsrelevanten Kontakte aus der Kenntnis der Bewegungsmuster bereits infizierter Personen rekonstruiert werden. Dies ist nahezu unmöglich. Liegen aber bereits relevante Kontaktdaten als aufgezeichnete Bewegungsprofile vor, können auf dieser Basis erregerspezifische **Modellierungen** durchgeführt werden, um ggf. bereits stattgefunden **Infektions-Risiken** für Personen zu **errechnen**. Gegenüber einem klassischen Screening-Verfahren wird an diese Modellierung der Anspruch gestellt, dass die wahrscheinlichsten Infektionsträger mit dieser Methode schneller identifiziert werden können.

Liegt auf diese Weise eine quasi **live-Kontaminationslandschaft** vor, kann zeitgleich mit baulichen Mitteln darauf reagiert werden, sei es z. B. durch die Aktivierung von Schleusen zur Zuweisung von Rot-Gelb-Grün-Bereichen oder durch die Umstellung der Lüftungstechnik zur Reduzierung der aerosolen Kreuzkontamination. Zukünftige Studiensettings müssen daher die Möglichkeiten der Kombination von GIS-Technologie und umsetzbaren infektionspräventiven Baukomponenten aufgreifen und für die Praxis anwendbar gestalten.

Die bestehenden Vorbehalte auf Seiten der Datenschutzbeauftragten lassen zurzeit die Implementierung der beschriebenen Systeme in Deutschland nicht zu. Weitere Forschungen, die die Effizienz der Unterbrechung von Infektionsketten mit der Unterstützung der GIS-Technologie weiter herausarbeiten, könnten ein schrittweises Umdenken zu Gunsten der gesundheitlichen gegenüber der datenschutztechnischen Patientensicherheit zur Folge haben.

4.3 Weiterentwicklung der Metabetrachtung

Die Strategien bei der Weiterentwicklung der bautechnisch-konstruktiven wie auch baufunktional-prozessualen Baukomponenten zeigt, dass sich diese auf sehr unterschiedlichen Abstraktionsebenen befinden. Von der Betrachtung des Materials über das Fügen der Teile im Detail bis hin zur Planung und Ausführung ganzer Gebäudestrukturen. Dieses zusätzlich mit dem Thema der Infektionsprävention gepaart, zeigt die Vielschichtigkeit und Komplexität der Herausforderung. Um hierbei gerade aus Sicht des Planers nicht die Gesamtübersicht zu verlieren, muss auch die übergeordnete Betrachtung der Planung berücksichtigt und hierfür ebenfalls Strategien entwickelt werden. Im Folgenden sollen daher zwei Ansätze dieser Herausforderung begegnen.

4.3.2 Optimierung der Planungssystematik und Implementierung in BIM

Die Praxis hat gezeigt, dass das Thema Hygiene bzw. Infektionsprävention im Planungs- und Realisierungsprozess des Bauens meist erst zum Tragen kommt, wenn die eigentliche Vorplanung des Gebäudes bereits abgeschlossen ist (s. Kap. 2.2.2). Dabei ist eine erfolgreiche zukunftsfähige und im Sinne dieser Arbeit infektionspräventive Bauplanung nur durch eine stringente **Planungssystematik** über alle Planungsphasen hinweg möglich.

Die für das Thema der baulichen Infektionsprävention zu optimierende Planungssystematik besteht aus drei Komponenten (Roth et al. 2015). Dabei sind die exakte Definition und Bearbeitung der Planungsphasen der Ausgangspunkt. Die Beschreibung des zugrundeliegenden Planungsprozesses stellt die übergeordnete Metaplanung dar. Diese kann bei der Initiierung eines Projektes in die „**Phasen der strategischen Planung**“ unterteilt werden (s. Abbildung 41). Die strategische Planung wird in Anlehnung an die Leistungsphasen 1 bis 9 der Honorarordnung für Architekten und Ingenieure häufig auch mit Leistungsphase Null bezeichnet (Holzhausen et al. 2015).

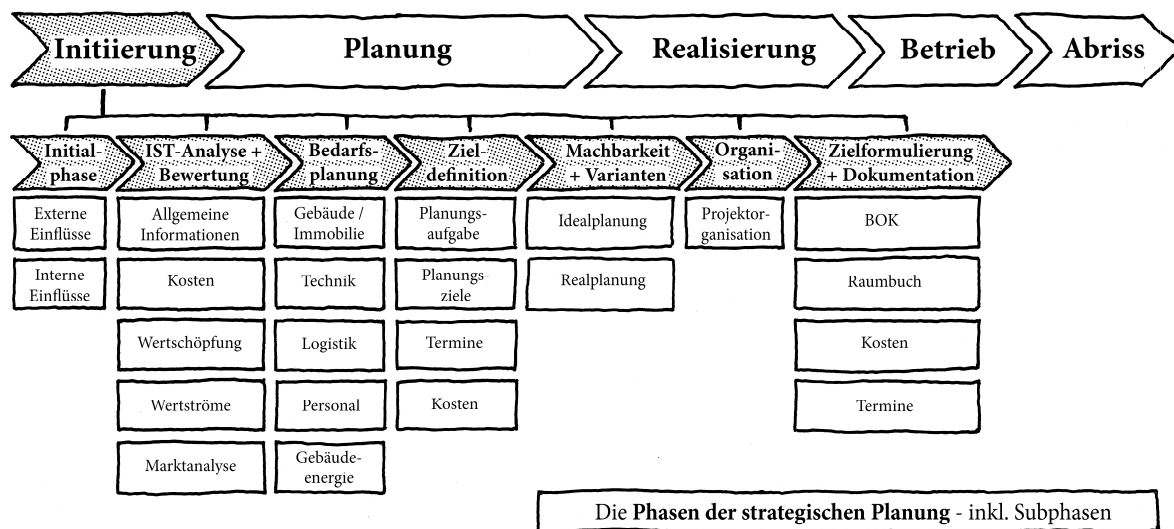


Abbildung 41: Einbettung des Hygienethemas und seiner Experten bereits in der initialen Projektphase (Holzhausen et al. 2015)

Die frühe Einbettung des Wissens von Experten in der LP 0 muss z. B. durch Einbindung von Hygieneexperten an Planungsbesprechungen in dieser entscheidenden Planungsphase erfolgen.

Damit das generierte Wissen entsprechend genutzt werden kann, muss in den einzelnen Planungsphasen eine strukturierte Informationsbeschaffung und –Aufbereitung von hygienerelevanten Fragestellungen mit entsprechenden **Planungs- und Entscheidungsmethoden** sichergestellt sein. Diese zweite Komponente der Planungssystematik muss z. B. mit einem entsprechend auf das Thema der baulichen Infektionsprävention abgestimmten Methodenkatalog unterstützt werden.

Um einen möglichen Informationsverlust von hygienerelevanten Fragestellungen im Planungsprozess entgegen zu wirken, muss von Projektbeginn an eine abgestimmte **Kommunikations- und Teamstruktur** aufgesetzt werden in der bereits Fachplaner wie Hygieneexperten berücksichtigt sind. Diese dritte Komponente der Planungssystematik ist in Form einer hierarchisch aufgebauten sogenannten Planerpyramide (s. Abbildung 42) für eine ideale Projektorganisation zielführend.

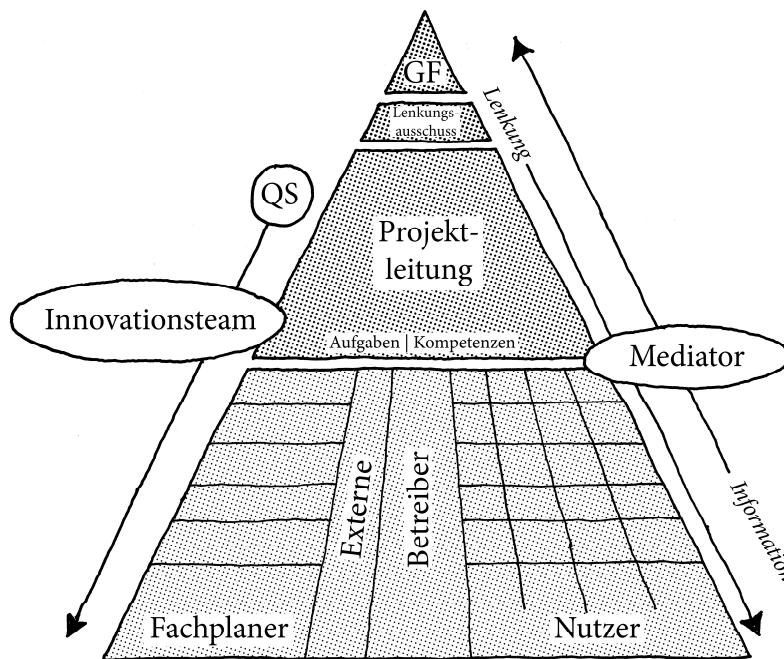


Abbildung 42: idealisierte Projektorganisation der Planungssystematik (in Anlehnung an Holzhausen et al. 2015)

Die Optimierung der Leistungsphase Null im Besonderen durch die Einbindung des Themas der baulichen Infektionsprävention mithilfe der drei Komponenten der gezeigten Planungssystematik wird den Planungsprozess stabilisieren und demzufolge einen störungsreduzierten Planungs- und Bauablauf gewährleisten an deren Ende ein infektionspräventionsoptimierter Bau steht.

Die Möglichkeit der **Implementierung** dieser drei Komponenten der Planungssystematik in Kombination mit Fragestellungen zur baulichen Infektionsprävention **in BIM-Systeme** (BIM = engl. Building Information Modelling) muss zukünftig geprüft werden, da hierin eine große Chance für das Bewusstwerden und die Sensibilisierung der Planer für das vorgelegte Thema dieser Arbeit gesehen wird. Diese BIM-Bauwerksdatenmodellierung mit Hilfe von Software wird heutzutage für die Erstellung aller relevanten Bauwerksdaten genutzt. Dabei wird der Bau auch geometrisch als virtuelles Modell visualisiert. Das Einbringen der infektionspräventiven Baukomponenten sowie die vorgestellte Planungssystematik in diese ganzheitliche Bauwerksdatenmodellierung in den Phasen der Bauplanung, der Bauausführung und nicht zuletzt auch in der Bauunterhaltung wird von großem Nutzen sein.

4.3.3 Entwicklung einer Klassifikation für alle Gebäudetypologien

Die vorangegangenen Kapitel haben gezeigt, wie komplex das Bauen allein für sich und zusätzlich noch gesteigert um die Infektionsprävention sein kann. Ursache hierfür sind z. B. die unterschiedlichen Beteiligten am Bauprozess wie Planer, Fachplaner, hinzugezogene Experten, Bauherren und Nutzer. Ebenso die zahlreichen Planungs- und Realisierungsphasen sowie die Berücksichtigung von mannigfaltigen Information zu den Anforderungen an das Gebäude und seiner Erstellung.

Aufgrund dieser Komplexität hat es sich in der Vergangenheit bewährt, ein strukturierendes Element über den sogenannten Problemraum zu legen. Für den Bereich der baulichen Infektionsprävention ist es daher sinnvoll, eine Klassifikation über alle Gebäudetypologien hinweg zu etablieren. Dabei soll analog zu einem Menschen die Höhe der Infektionsexposition einer Gebäudetypologie erfasst werden. Ein Überblick über bestehende Gebäudeklassifikationen soll die Notwendigkeit und ihren Nutzen verdeutlichen.

Eine **Gebäudeklassifikation** im Bereich der Gebäudeplanung gibt es unter der klassischen Differenzierung nach Konstruktion und Material (z. B. Holz – Skelettbau), nach Funktion (Wohnbau, Bürogebäude, Fabrik), nach Gestalt (z. B. offene Bauweise, Blockrandbebauung), nach rechtlichen Gesichtspunkten (z. B. öffentl. Baurecht, Gebäudeklasse) und nach Energiestandards (z. B. Niedrigenergiehaus, Passivhaus, Plusenergiehaus). Die für die verschiedenen Themen entwickelten Klassen werden meist in Normen und Verordnungen erfasst. Beispielhaft sollen hier die Brandschutzklassen (DIN 4102-1 1998; EN 13501-1 2010) und Schallschutzklasse für Bauteile (DIN 4109 2018), Energie-Effizienzklassen Bau (EnEV 2014), Bauartklassen, Ermittlung Flächenstandards (DIN EN 15221-6 2011; ISO 9836 2017) und Gebäudeklassen genannt werden. In Deutschland wird die Gebäudeklasse über die Landesbauordnungen und die Musterbauordnung geregelt. Die Einteilung hängt hierbei von den unterschiedlichen Bauteil- und Baustoffanforderungen ab. Die Höhe der Gebäudeklasse regelt somit indirekt beispielsweise die Anforderungen an die Feuerwiderstandsdauer der Bauteile.

Alle vorgenannten Klassifikationsmodelle und Standards beinhalten keine Aussagen zur baulichen Infektionsprävention. Eine einheitliche und umfassende Gebäudeklassifikation differenziert nach ihrer Infektionsexposition über alle Gebäudetypologien hinweg konnte nicht ausgemacht werden. Es gibt bestehende Klassifikationen und Leitlinien, die Einfluss auf die bauliche Konzeption im Rahmen der Infektionsprophylaxe in explizit ausgewählten Sonderbereichen haben. Hier wären zu nennen:

Die biologische Sicherheitsstufe 1 bis 4 (S1-S4) für Laborbereiche, Produktionsbereiche, Gewächshäuser und Tierhaltungsräume nach dem Gentechnikgesetz (GenTG) sowie die technischen Regeln für biologische Arbeitsstoffe (TRBA-500 2012). Diese wurden bereits in Kap. 2.3.2.2 *Flächenzuweisung und Barrieren* näher erläutert.

Des Weiteren die Reinraum-Klassifikation differenziert nach Branche wie z. B. Halbleitertechnik mit der Hauptkontamination über Partikel (DIN EN ISO 14644-1 2015),

Lebensmitteltechnik mit der Hauptkontamination über Mikroorganismen (VDI 2083 2010) und Pharmazie mit der Hauptkontamination ermittelt über die Keimzahl (EU-GMP 2008).

Ebenso die Empfehlungen der Kommission für Krankenhaushygiene und Infektionsprävention (Robert Koch Institut 2001-), ((KRINKO 2010a).

Sowie die Empfehlungen für Lüftungskonzepte über den Betrieb von raumluftechnische Anlagen im Krankenhaus (DIN 1946-4 2008).

Die exemplarisch genannten Klassen, Regeln und Empfehlungen befassen sich mit Teil- bzw. Detailbereichen von z. B. Haustechnik oder Hygiene. Eine übergeordnete ganzheitliche Betrachtung findet bisher nicht statt. Dem Planer wird aufgrund der unübersichtlichen Vorschriftenlage die Planungstätigkeit erschwert und die bauliche Infektionsprävention daher nicht optimal realisiert.

Ziel einer zukünftigen Forschung muss daher die Einordnung von Gebäude- und Infrastruktursystemen in eindeutige standardisierte Klassen aus infektionsprophylaktischer Sicht sein. Diese Klassifikation soll den Planer dieser Infrastrukturen bei der Wahl der Maßnahmen zur baulichen Infektionsprävention unterstützen. Diese Herangehensweise würde eine ganzheitliche Grundlage zur Betrachtung, Bewertung und Einordnung des sehr komplexen Themenfeldes im Spannungsfeld der unterschiedlichsten Gebäudetypologien und vielfältigsten Infektionsmöglichkeiten darstellen. Andere Themengebiete des Bauens haben gezeigt, dass eine Klassifikation (vergleichend wird hier wiederum der Brandschutz genannt) dem Planer ein wichtiges Entscheidungskriterium an die Hand gibt, um zum Wohle des Nutzers der Gebäude- und Infrastruktursysteme zu planen.

Im Rahmen der vorgelegten Arbeit wurde das Forschungsprojekt BIPROC (Kurzai et al. 2016) mitentwickelt. Dieses greift die Idee einer Klassifikation auf und will die Umsetzung im Bereich der Tierzucht prüfen (s. Kap. 4.4.5).

4.4 Entwickelte transsektorale Forschungsansätze

Die vorgelegte Arbeit entstand als Teil des Basisprojekts **Transsektoralen-Forschungs-Plattform** (TFP) des InfectControl 2020 Konsortiums (Kurza et al. 2016). Insgesamt 14 Doktoranden aus unterschiedlichsten wissenschaftlichen Disziplinen sollten sektorübergreifende Strategien der Infektionsprävention entwickeln. Neben der Analyse und Bewertung der jeweiligen Disziplinen im Zusammenspiel mit der Infektionsübertragung, war die Erarbeitung von explorativen Projekten bzw. Prinzip-Strategien, die als Grundlage für neue umfangreichere Forschungsvorhaben dienen können, zentraler Bestandteil der Teilprojekte. So diente diese Arbeit als Kristallisationskeim für eine Reihe von neuen Forschungsideen. Diese wurden parallel zu dieser hier vorgelegten Arbeit in einer Vielzahl von Forschungsanträgen eingebracht. Nicht alle haben den Weg durch die Beurteilung der Gutachter bzw. wissenschaftlichen Beiräte geschafft. Daher sollen folgend vier ausgesuchte und bewilligte Projekte die möglichen strategischen Ansätze darstellen, die für den Teilbereich der baulichen Infektionsprävention ihren Ausgangspunkt in dieser Arbeit hatten. Alle Projekte wurden vom Verfasser dieser Arbeit am Institut für Industriebau und Konstruktives Entwerfen der TU Braunschweig mitentwickelt.

Erläuternd hier der Hinweis, dass es sich aufgrund des transsektoralen Ansatzes immer um Verbundprojekte bzw. **Verbundvorhaben** mit sogenannten **Teilvorhaben**, abgekürzt **TV**, der entsprechenden wissenschaftlichen Disziplinen handelt. Die Durchführung der Projekte wird hierbei über sogenannte **Arbeitsschwerpunkte**, abgekürzt **AS**, beschrieben.

4.4.2 HYFLY

Verbundvorhaben

Effektive Strategien zur Kontrolle von und im Umgang mit Ausbreitungswegen von Erregern im Luftverkehr (**HYFLY**) (Kurza et al. 2016)

Projektpartner

- Otto-Schott-Institut für Materialforschung (OSIM), Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Fraunhofer-Institut für Zelltherapie und Immunologie (IZI), Leipzig
- Institut für Industriebau und Konstruktives Entwerfen (IIKE), TU Braunschweig
- Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK), Potsdam
- Robert Koch-Institut (RKI), Fachgebiet (FG) 32 Surveillance, Berlin
- Schmuhl Faserverbundtechnik GmbH & Co. KG (SFVT), Liebschütz
- Airport Service Gesellschaft mbH (ASG), Frankfurt am Main
- Villeroy & Boch AG (V&B), Global R&D, Mettlach

Gesamtziele des Verbundvorhabens

Hauptziel dieses Projektes ist es, die Infektionsketten im Luftverkehr zu verstehen und entsprechend zu unterbrechen. Dazu sollen Risikofaktoren und Übertragungswege erkannt und bewertet werden. Des Weiteren sollen konkrete Handlungsempfehlungen abgeleitet und in Form von Musterlösungen in ausgewählten Fällen realisiert werden.

Im Verbundprojekt erfolgt durch Bündelung verschiedener fachlicher Kompetenzen aus Forschung und Industrie als gemeinsame Basis für das Gesamtprojekt HYFLY **erst-mals eine sektorübergreifende** Analyse von Risikofaktoren zur Infektionsübertragung im Luftverkehr und darauf beruhend die Priorisierung von Handlungsfeldern (Arbeitsschwerpunkt - AS 1). Betrachtet werden hier der Einfluss von infektionsepidemiologischen/medizinischen Aspekten, klimatischen Gesichtspunkten, verwendeten Materialien und der Infrastruktur und damit verbundene prozessuale Abläufe auf die Infektionsverbreitung im Luftverkehr. So sollen gezielt Ansatzpunkte für Durchbruchsinnovationen identifiziert werden. AS 1 bildet damit die Grundlage für alle folgenden AS.

Ein relevanter Risikofaktor sind die äußeren klimatischen Bedingungen, die unabhängig von infrastrukturellen Gesichtspunkten die Ausbreitung von Infektionskrankheiten mitbestimmen. Es soll ein Bewertungskatalog von Flughäfen aus klimatischer Sicht entwickelt werden (AS 2). Entfernte Regionen rücken unter Berücksichtigung des weltweiten Flugverkehrs näher zusammen. Durch das Zusammenführen von globalen Klima- und Flugroutendaten sollen Klima- und Infektionsbrücken identifiziert werden, welche für die weltweite Ausbreitung von Infektionserregern eine zentrale Rolle spielen.

AS 3 hat zum Ziel, das Infektionsübertragungsrisiko durch optimierte Materialoberflächen und durch innovative Detaillösungen (baulich-konstruktiv, diagnostikbasiert) zu reduzieren. Dabei werden die in AS 1 identifizierten, für eine Infektionsausbreitung kritischen Materialien im Infrastrukturbau und Transportmittel als Basis für die geplanten Untersuchungen und Entwicklungen verwendet. Es werden Standardreinigungs- und Desinfektionsverfahren von Materialoberflächen kritisch in Bezug auf die Wirksamkeit in Abhängigkeit von Erregertyp und verwendetem Mittel untersucht, sowie die Frage geklärt, wie reinigungs- und alterungsbedingte Veränderungen der Materialoberflächen das Infektionsübertragungsrisiko beeinflussen. Basierend auf neuartiger Filtertechnologie sollen Konzepte zur schnellen medizinischen nicht-invasiven Erfassung von insbesondere respiratorischen Erkrankungen (z. B. SARS) des Menschen entwickelt werden.

Auch strukturell-prozessuale Abläufe im Luftverkehr sind ein relevanter Faktor bei der Übertragung von Infektionen. So soll in AS4 exemplarisch anhand eines Passagiers die infektionsanfällige Prozesskette vom Betreten des Flughafengebäudes bis hin zum Platznehmen im Flugzeug analysiert werden. Über eine Risikobewertung besonders kritischer Funktions- und Schnittstellen, wie z. B. Passagierschleusen, medizinische

Versorgung oder Abfertigungsbereiche im Flughafen oder Flugzeug, sollen hierbei mögliche prozessuale Schwachstellen identifiziert werden. Im Ergebnis steht das „Infect-Control Weißbuch“ mit einem zukunftsfähigen robusten Masterplan und konkreten Handlungsempfehlungen für den infektionskritischen Akutfall.

Alle im Verbundprojekt HYFLY vorgenommenen Priorisierungen, Handlungsempfehlungen und Entwicklungen geschehen unter Berücksichtigung international geltender Richtlinien im Flugverkehr (z. B. ICAO, IATA).

Arbeitsziele des Verbundes

Im **Arbeitsschwerpunkt 1** ist das übergeordnete Ziel die sektorübergreifende Analyse der Übertragungswege von Infektionen im und durch den Luftverkehr. Der Lösungsansatz umfasst die Identifizierung und Bewertung von Risikofaktoren, die eine Infektionsübertragung begünstigen. Basierend auf einer Wichtung der Risikofaktoren werden dann Handlungsfelder priorisiert und erste Handlungsempfehlungen abgeleitet. Die Analyse erfolgt in einem ganzheitlichen, interdisziplinären Ansatz nach vier verschiedenen sich ergänzenden Aspekten mit jeweils eigenen wissenschaftlichen Zielen, die im Detail den Teilvorhabenbeschreibungen zu entnehmen sind. Im Überblick sind das:

Infektionsepidemiologie/Medizin: Analyse des Risikos zur Übertragung von Infektionen durch den Luftverkehr unter Berücksichtigung aktueller epidemiologischer und demografischer Entwicklungen inklusive der Identifizierung relevanter pathogener Keime.

Klima: Analyse und Bewertung klimatischer Kennwerte (Witterungsverläufe) von Flughafenstandorten zur Untersuchung der äußeren klimatischen Rahmenbedingungen, die die Überlebensfähigkeit von Infektionserregern begünstigen.

Materialien/Materialoberflächen: Klassifizierung von Materialoberflächen im Flugzeug und im Flughafen gemäß ihrem Infektionsübertragungsrisiko, Analyse der Vorschriften, Richtlinien und der Umsetzung der Reinigung und Desinfektion von Materialoberflächen und Ableitung materialbasierter und reinigungsbasierter Handlungsempfehlungen zur Unterbrechung von Infektionsketten.

Struktur und Prozesse: Analyse und Bewertung infektionskritischer baulicher Begebenheiten (Übergänge, Schnittstellen etc.) im Flugzeug und Flughafen, Analyse infektionskritischer Prozesse (Bewegungsmuster von Menschen oder Gütern) und Erarbeitung antiinfektionsstrategischer Lösungsansätze.

Im **Arbeitsschwerpunkt 2** werden die Untersuchungen aus AS 1 mit dem Schwerpunkt Klima vertieft fortgesetzt. Basierend auf der klimatischen Analyse der Flughafenstandorte (AS 1) sollen unter Einbeziehung von Flugroutendaten weltweite Klimabrücken identifiziert werden. Mittels der Auswertung von Infektionsdatenbanken und der Ableitung von Klima-Erreger-Beziehungen kann eine mögliche Ausweitung der Klimabrücken zu Infektionsbrücken abgeleitet werden. Flughäfen als Knotenpunkte im weltweiten Ausbreitungsnetzwerk von Infektionen sollen hinsichtlich ihres individuellen

Risikos bewertet werden. Nach Untersuchung der gegenwärtigen Situation erfolgt abschließend im AS 2 die Untersuchung des Einflusses von klimatischen Veränderungen (Klimaerwärmung) auf die Ausbildung von Klima- und Infektionsbrücken basierend auf einem Klimavorhersagemodell.

Die übergeordneten wissenschaftlich-technischen Ziele von **Arbeitsschwerpunkt 3** sind die Konkretisierung von im AS 1 abgeleiteten ersten Handlungsempfehlungen unter dem Aspekt Material und Materialoberflächen und die Konzeptionierung und Umsetzung von Musterdetaillösungen zur Unterbrechung von Infektionsketten.

Basierend auf der Analyse der Keimbelastung und Identifizierung von Krankheitserregern im Flugzeug und Flughafen in AS 1, sollen ergänzt durch eine physikochemische Charakterisierung der Materialien und Materialoberflächen Rückschlüsse auf die materialbasierte Verbreitung von Infektionen gezogen werden (wissenschaftliche Untersuchung der Struktur-Eigenschafts-Beziehungen). Dabei sollen verschiedene Aspekte wie zum Beispiel Passagier-Material-Kontakte, Materialabnutzung und Reinigung berücksichtigt werden.

Im Bereich der technischen Ziele sollen verschiedene baulich-konstruktive Musterdetaillösungen erarbeitet werden, die mit hoher Wahrscheinlichkeit einen signifikanten Einfluss auf die Unterbrechung von Infektionsketten haben. Diese umfassen u. a. bestimmte Oberflächenmodifikationen (antimikrobielle Glasuren), Oberflächen mit einer reduzierten Biofilmbildung, die Oberflächendesinfektion mittels LED-UV-Technologie, die Materialentwicklung für eine Kabinentrennwand und die Konzeptionierung eines filterbasierten nicht-invasiven Diagnostiktools zur Untersuchung von Krankheitserregern in der Atemluft.

Teilvorhaben TV 3 – Bereich Bau

Infektionssichere Master- und Akutplanung von Flughäfen

Gesamtziel des Teilvorhabens 3

Im Teilvorhaben 3 werden gemeinsam mit dem Institut für Materialforschung (OSIM), dem Robert Koch-Institut (RKI) und der Airport-Service-Gesellschaft (ASG) sektorübergreifende Risikofaktoren der Infektionsübertragung anhand der Gebäudestruktur und damit verbundener prozessualer Abläufe im Bereich Flughafen identifiziert und bewertet. Auf Grundlage dieser zusammengeführten und gewichteten Risikofaktoren, sollen konkrete Handlungsempfehlungen zur Infektionsunterbrechung abgeleitet werden. Dabei sollen im Verbund von wissenschaftlichen Einrichtungen und Industriepartnern entsprechende Modelllösungen für konkrete Problemstellungen, die mit großer Wahrscheinlichkeit einen signifikanten Einfluss auf die Infektionsunterbrechung haben, erarbeitet werden. Diese Empfehlungen sollen am Ende in ein Weißbuch einfließen.

Arbeitsziele des Teilvorhabens 3

Das TV 3 identifiziert und bewertet in diesem **ersten Arbeitsschwerpunkt** zunächst die infektionskritischen baulichen Schnittstellen der Gesamtstruktur des Flughafens im Übergang an das angeschlossene infrastrukturelle Umfeld. In einem zweiten und dritten Schritt werden sowohl alle wesentlichen infrastrukturellen Komponenten eines Flughafens (wie z. B. Terminal, Parkhaus, Feuerwehr, Hallen) als auch die infektionskritischen Funktionsstellen, wie etwa Check-In, Security Check, Gate oder bestimmte Bereiche im Übergang zum Flugzeug oder im Flugzeugs selbst betrachtet. Zusätzlich werden die unterschiedlichen Bewegungsströme von Menschen, Materialien und Gütern unter infektionskritischen Gesichtspunkten bezogen auf das räumliche Layout bezogen.

Im AS 2 ist das Teilvorhaben TV 3 – Bereich Bau - nicht beteiligt, hier wird das Schwerpunktthema Klima erarbeitet.

AS 3 hat zum Ziel, das Infektionsübertragungsrisiko durch geeignete Materialoberflächen und durch baulich-konstruktive Lösungen zu reduzieren. Dabei werden die in AS 1 identifizierten für eine Infektionsausbreitung kritischen Materialsysteme (z. B. mit häufig wechselndem Personenkontakt und/oder hoher Keimbelastung) im Infrastrukturbau und Transportmittel sowie relevante Erregertypen als Basis für die geplanten Untersuchungen und Entwicklungen verwendet. Darüber hinaus werden Standardreinigungs- und Desinfektionsverfahren von Oberflächen kritisch in Bezug auf ihre Wirksamkeit in Abhängigkeit von Erregertyp und verwendetem (Reinigungs-)Mittel untersucht, sowie die Frage geklärt wie reinigungs- und altersbedingte Veränderungen der Materialoberflächen das Infektionsübertragungsrisiko beeinflussen.

Das TV 3 entwickelt im **Arbeitsschwerpunkt 3** baulich-konstruktive Detaillösungen zur Unterbrechung von Infektionsübertragungswegen in den im AS 1 identifizierten Risikobereichen von Infrastrukturbau und Transportmittel. In einem ersten Arbeitspaket werden innovative baukonstruktive und prozessoptimierte Lösungen zur Verortung von Komponenten in Sanitärbereichen (z. B. Toilette mit der baukonstruktiven Verbindung zur Wand) erstellt. In einem weiteren Arbeitspaket werden baukonstruktive Lösungen für Bereiche im Flughafen entwickelt, die bei Untersuchungen der Partnern O-SIM und SFVT identifiziert wurden. Dies könnten zum Beispiel Handläufe und Einhausungen sein.

Auch strukturell-prozessuale Abläufe im Luftverkehr sind ein relevanter Faktor bei der Übertragung von Infektionen. So soll in AS4 exemplarisch anhand eines Passagiers die infektionsanfällige Prozesskette vom Betreten des Flughafengebäudes bis zum Platznehmen im Flugzeug analysiert werden. Über eine Risikobewertung besonders kritischer Funktions- und Schnittstellen, wie z. B. Passagierschleusen, medizinische Versorgung oder Abfertigungsbereiche im Flughafen oder Flugzeug, sollen hierbei mögliche prozessuale Schwachstellen identifiziert werden. Im Ergebnis steht das „Infect-Control Weißbuch Flughafen“ mit einem zukunftsfähigen robusten Masterplan und konkreten Handlungsempfehlungen für den infektionskritischen Akutfall.

Für die Erstellung des „InfectControl Weißbuches Flughafen“ entwickelt das TV 3 im **Arbeitsschwerpunkt 4** einen Anforderungskatalog sowohl aus Sicht der funktionalen Abhängigkeiten (Bauorganisation) als auch aus Sicht der infektionskritischen Funktionsstellenbeziehungen (Prozessabläufe). Auf dieser Grundlage wird die infektionssichere Masterplanung erstellt, die Teillösungen zur baulichen und prozessualen Optimierung zu Zwecken der Infektionsprävention differenziert nach verschiedenen Betrachtungsebenen entwickelt. Das Weißbuch generiert des Weiteren Handlungsempfehlungen für die infektionssichere Akutplanung. Gemeinsam mit den assoziierten Projektpartnern Lufthansa Technik und Airbus sollen innovative baukonstruktive Lösungen (z. B. temporäre Isolierung eines infizierten Fluggastes mit „Raum-im-Raum“-Prinzip) und infektionssichere Prozesslösungen (z. B. Passagierlenkung, medizinische Versorgung, Reinigungsintervalle) aufgezeigt werden.

4.4.3 KARMIN

Verbundvorhaben

Untersuchungen zum Einfluss der **Architektur** und des Designs auf das Auftreten von nosokomialen **Infektionen** und multiresistenten Erregern und zur Besiedlung eines neuen **Krankenhauses** mit **Mikroorganismen** (Kurzai et al. 2016)

Projektpartner

- Institut für Industriebau und Konstruktives Entwerfen (IIKE), TU Braunschweig
- Septomics Research Group, Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Institut für Hygiene und Umweltmedizin, Charité Universitätsmedizin Berlin
- Röhl GmbH, Waldbüttelbrunn

Gesamtziele des Verbundvorhabens

Als Reaktion auf das vermehrte Auftreten von multiresistenten Erregern wird in Deutschland mit einer Erhöhung der Anzahl von Einzelzimmern im Krankenhaus reagiert. Das Projekt KARMIN hat das Ziel, wichtige Daten für die Entscheidung zu liefern, ob alternativ Zweibettzimmer dahingehend ertüchtigt werden können, dass sie infektionsprophylaktisch eine Alternative zum Einbettzimmer darstellen können. Im Hinblick auf diese Infektionsprävention soll die Untersuchung des Krankenhausmikrobioms bei der Neubesiedlung wichtige Erkenntnisse für die Errichtung und den Betrieb von Krankenhäusern liefern.

Der Arbeitsschwerpunkt 1 hat zum Ziel, ein infektionssicheres Zweibettzimmer inklusive Nasszelle als Alternative zu Einbettzimmern zu entwerfen und als Demonstrator zu realisieren. Dabei werden zunächst mit den Verbundpartnern der TU Braunschweig, der Charité Berlin sowie dem Industriepartner RÖHL sektorenübergreifend Risikofaktoren zur Infektionsübertragung im Patientenzimmer, der angeschlossenen Nasszelle und dem angrenzenden Funktionsbereich anhand baulicher Gegebenheiten und prozessualer Abläufe identifiziert und bewertet. Diese werden in einer Gesamtbetrachtung zusammengeführt und in konkrete Empfehlungen zur Unterbrechung von Infektionsausbreitungswegen abgeleitet. Diese Empfehlungen dienen als Grundlage für den Entwurf eines infektionssicheren Zweibettzimmers inklusive Nasszelle, inklusive ausführungsreifen Plansatzes, Detaillösungen und Kostenaufstellung. Im Ergebnis dieses AS 1 soll ein Demonstrator für infektionsprophylaktisch sinnvoll ausgestattete Zweibettzimmer inkl. der Nasszelle realisiert werden. Dieser Demonstrator soll Antwort geben, ob das Zweibettzimmer trotz der vielen Infektionskrankheiten/Erregern ausreichend infektionssicher für die Unterbringung von Patienten geeignet ist.

In dem Arbeitsschwerpunkt 2 wird der Einfluss von Einbettzimmern und bestimmten Reinigungsregimes auf die Prävalenz von multiresistenten Erregern (MRE) und die Entwicklung des Krankenhausmikrobioms untersucht. Dabei stellt der Erstbezug des neu renovierten Charité-Bettenhochhauses den Rahmen der Untersuchung dar. Die Verbundpartner Charité Berlin, Septomics Jena und TU Braunschweig haben das Ziel, Abhängigkeiten von architektonischen Gegebenheiten (Vergleich zwischen Mehrbett- und Einbettzimmern) bzw. in Abhängigkeit verschiedener Reinigungsregimes (Vergleich zwischen Flächendesinfektion und Flächenreinigung) in der Entstehung und in der Diversität des Mikrobioms und des Aufkommens multiresistenter Bakterien zu definieren. Der Arbeitsschwerpunkt 1 liefert damit wichtige Hinweise für den Bau und Betrieb von Krankenhäusern im Hinblick auf die Infektionsprävention.

Teilvorhaben TV 1 – Bereich Bau

Infektionssichere Planung eines Zweibettzimmers inklusive Nasszelle

Arbeitsziele des Teilvorhabens 1

Im **Arbeitsschwerpunkt 1 „Optimierung Zwei-Bett-Zimmer / Entwicklung Demonstrator / Prototyp Nasszelle“** soll zunächst in einer **Basisperiode** eine bauwissenschaftliche Analyse und Bewertung von infektionskritischen Bereichen durchgeführt werden. Anhand einer umfassenden Literaturrecherche zu nationalen und internationalen Forschungsstudien und dem intensiven Wissensaustausch mit allen beteiligten Projektpartnern (z. B. durch Workshops und Ideenbörsen) sollen gemeinsame interdisziplinäre antiinfektionsstrategische Lösungsansätze für das Patientenzimmer und die Nasszelle erarbeitet werden.

Auf Grundlage der bauwissenschaftlichen Analyse und den transsektoralen Lösungsansätzen wird in der **Studienperiode** ein infektionssicherer innovativer Entwurf für ein optimales infektionssicheres Patientenzimmer inklusive Nasszelle erarbeitet. Dabei sollen verschiedenen Aspekte, wie z. B. Baustruktur, Funktionswegebeziehungen, Wandlungsfähigkeit bestimmter Bereiche, Abläufe, Detaillösungen, Oberflächen betrachtet und zu einem baulichen Musterkonzept zusammengeführt werden. Das Musterkonzept wird in einem nächsten Schritt in einen ausführungsreifen Entwurf überführt, der die Grundlage für die Realisierung eines Demonstrators darstellt. Der Entwurf beinhaltet sowohl einen Plansatz (Grundrisse, Schnitte, Ansichten) in den erforderlichen Maßstäben mit den erforderlichen Angaben zu Material, Qualität und Beschaffenheit, zu Toleranzen und zur Verarbeitung als auch Detaillösungen im größeren Maßstab und die Aufstellung aller erforderlichen Kosten. Im engen und kontinuierlichen Austausch und Wissensabgleich mit dem Verbundpartner RÖHL und weiteren hinzu zu ziehenden Ausstattern wird der Entwurf in Form eines Demonstrators baulich realisiert. Die damit zusammenhängende baufachliche Unterstützung, Beratung und Koordination bei der Realisierung des Demonstrators ist Teil des AP 2.

In der abschließenden **Finalisierungsperiode** wird der Demonstrator Eignung und Zweckmäßigkeit evaluiert. Dies erfolgt durch die transsektorale Betrachtung und den Einsatz verschiedener Methoden, wie z. B. Befragung, Monitoring, Oberflächenanalyse. Anhand der Evaluierungsdaten werden die baulichen Strukturen ausgetauscht, modifiziert und optimiert.

Der **Arbeitsschwerpunkt 2 „Untersuchung Einzug Krankenhausmikrobiom / Studie Einfluss Flächendesinfektion vs. -reinigung auf Mikrobiom“** untersucht die Entwicklung des Krankenhausmikrobioms in verschiedenen Stationen im neuen Charité-Bettenhochhaus nach Einzug in die neue Klinik (Einzel- vs. Zweibettzimmer) mit integrierter kontrollierter Studie zur Untersuchung des Einflusses von Flächendesinfektion/-reinigung auf die Ausbildung des Krankenhausmikrobioms in ausgewählten Patientenzimmern.

Das TV 1 analysiert und bewertet die Ergebnisse der Untersuchung des Krankenhausmikrobioms auf den verschiedenen Stationen des Charité-Bettenhochhauses und erstellt Schlussfolgerungen, die für den Bereich Bau relevant sind.

4.4.4 EKOS

Verbundvorhaben

Entwicklung eines neuartigen **Konzepts** zur **Sicherstellung** der infektiologisch-medizinischen Versorgung von seltenen, hochkontagiösen und lebensbedrohlichen Erkrankungen in Schwerpunktkrankenhäusern (Kurzai et al. 2016)

Projektpartner

- Robert Koch-Institut, Informationsstelle des Bundes für Biologische Gefahren und Spezielle Pathogene, Berlin
- Institut für Tier- und Umwelthygiene, FU Berlin
- Institut für Industriebau und Konstruktives Entwerfen, TU Braunschweig
- Fachgebiet Interkulturelle Wirtschaftskommunikation, Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Herman-Rietschel-Institut, TU Berlin
- Nord-West-Box GmbH, Oldenburg

Gesamtziele des Verbundvorhabens

Globalisierung, Migration und Klimawandel führen zum vermehrten Aufkommen von Patienten mit seltenen, lebensbedrohlichen, hochkontagiösen Erkrankungen, den sogenannten **HoKo-Patienten**. Die Konfrontation von Schwerpunktkrankenhäusern mit dem Ebolafieber haben in der Vergangenheit gezeigt, dass diese Häuser oft nicht die fachlichen und technischen Voraussetzungen haben, HoKo-Patienten entsprechend zu versorgen. Zusätzlich führte die Angst des Personals dazu, dass Verdachtsfälle entweder gar nicht oder nur inadäquat behandelt wurden. Sekundärinfektionen und progressive Krankheitsverläufe wurden dabei in Kauf genommen.

Aus diesem Grund hat das Projekt EKOS das Ziel, HoKo-Patienten infektiologisch-medizinisch sicher in Schwerpunktkrankenhäusern zu versorgen. Hierfür wird ein zukunftsfähiges Konzept für einen temporären Isolierbereich entwickelt. Diese beinhaltet ein baufunktionales sowie prozessuales Hygienemanagement. Darüber soll die Effizienz von Barrieremaßnahmen sichergestellt werden. Zusätzlich wird zur Erhöhung der Resilienz von Krankenhaus und Personal ein integratives Kommunikationskonzept erarbeitet.

Arbeitsziele des Verbundes

Neuartig am Projekt ist die Entwicklung einer einfachen und zuverlässigen technischen Lösung für einen temporären Isolierbereich, von Standards zum optimierten Hygienemanagement mit evidenzbasierter Verifizierung der Barrieremaßnahmen durch Un-

tersuchung des Keimauftritts, sowie die Entwicklung transsektoraler Standards für Hygienemaßnahmen und Trainingsprogramme. Erstmals werden kommunikativ Ängste/Stigmatisierungen des Personals reduziert und ein Imageschaden des Krankenhauses minimiert. Die Einbindung der Krankenhäuser stellt die Anwendungsorientierung der Ergebnisse sicher. Die Musterentwicklung garantiert Verwendungsmöglichkeit in weiteren Krankenhäusern der Region und in Deutschland.

Innovative Lösungsansätze sind hierbei die Entwicklung neuer Schulungskonzepte zur Prävention von nosokomialen Infektionen, die so konzipiert sind, dass sie später auch von nicht im Projekt beteiligten Krankenhäusern genutzt werden können.

Des Weiteren soll die Anbindung an die STAKOB-Behandlungszentren (STAKOB = Ständiger Arbeitskreis der Kompetenz- und Behandlungszentren für Krankheiten durch hochpathogenen Erreger) per „Telemedizin“ optimiert werden, so dass die sehr spezifische Fachexpertise zur Behandlung von HoKo-Patienten aus den STAKOB-Zentren schnell hinzugezogen werden kann und nicht flächendeckend vorgehalten werden muss.

Innovativ ist ebenso die Resilienzförderungs- und Kommunikationsstrategie zum sensiblen Themengebiet im Umgang mit HoKo-Patienten.

Als **technische Zielparame-ter** steht die Entwicklung infrastruktureller Voraussetzungen zur Minimierung der Keimverbreitung bei der Versorgung von HoKo-Patienten im Vordergrund, die in der Entwicklung und Umsetzung eines temporären Isolierbereiches münden soll.

Des Weiteren die bauliche Musterlösung für ein baulich-funktionales Hygienemanagement für möglichst alle baulichen Voraussetzungen von Schwerpunktkrankenhäusern.

Weiteres wichtiges technisches Ziel ist die Überprüfung des Barrieremanagements auf Grundlage von Erregernachweisen und mathematischen Modellierungen zur Aerosolausbreitung.

Teilvorhaben TV 3 – Bereich Bau

Infektionspräventive bauliche Musterlösung: Temporärer Sonder-Isolierbereich im Schwerpunktkrankenhaus

Gesamtziel des Teilvorhabens 3

Beginnend wird in diesem Teilvorhaben 3 ein Konzept zur strategischen Verteilung von Schwerpunktkrankenhäusern zusammen mit dem Robert Koch-Institut (RKI) entwickelt, um eine flächendeckende deutschlandweite Versorgung mit temporären Sonderisolierbereichen zu gewährleisten. Anschließend werden mit den Verbundpartnern des Robert Koch-Instituts, der TU und FU Berlin sowie mit dem Industriepartner Nord-

West-Box sektorenübergreifend Risikofaktoren im Zusammenhang mit der Infektionsübertragung im temporären Sonder-Isolierbereich und seinen angrenzenden Flächen anhand der Infrastruktur und damit verbundener Prozesse erkannt und gewichtet. Anhand dieser zusammengeführten und bewerteten Risikofaktoren werden konkrete Handlungsempfehlungen zur Infektionsunterbrechung abgeleitet. Im Verbund von Industriepartnern und wissenschaftlichen Einrichtungen werden Modellösungen für diese konkreten Problembereiche entwickelt. Am Ende sollen diese in eine gebaute Musterlösung für den temporären Sonder-Isolierbereich münden.

Arbeitsziele des Teilvorhabens 3

Das TV 3 entwickelt im **Arbeitsschwerpunkt 1** ein Konzept mit dem Fokus Architektur und Bau zur strategischen Ansiedlung von Schwerpunkt-KH (KH = Krankenhaus) in Deutschland. Es unterstützt hierbei das Robert Koch-Institut bei der Erstellung eines intersektoralen Konzeptes.

Im **Arbeitsschwerpunkt 2** „Bauliches Hygienemanagement“ sollen infrastruktureller Voraussetzungen zur Minimierung der Keimverbreitung bei der Versorgung von HoKo-Patienten entwickelt werden. Dies soll zum einen durch die Entwicklung und Umsetzung eines temporären Isolierbereiches mittels neuartiger Zeltlösung für die beteiligten Schwerpunkt-Krankenhäuser geschehen (Leader Partner Nord-West-Box). Darüber hinaus soll eine bauliche Musterlösung für ein baulich-funktionales Hygienemanagement für möglichst alle baulichen Voraussetzungen von Schwerpunkt-KH entwickelt werden (TU Braunschweig) und eine Überprüfung des Barrieremanagements auf Grundlage von Erregernachweisen und mathematischen Modellierungen von Aerosolausbreitung stattfinden (TU und FU Berlin).

Das TV 3 unterstützt hierbei die Entwicklung des AP 2.4 „Isolierzelt“ des Firma Nord-West-Box. Hauptverantwortlich zeichnet sich das TV 3 im **Arbeitsschwerpunkt 2** für die Entwicklung einer Musterlösung eines temporären Sonder-Isolierbereiches aus. Hierbei werden zunächst die Anforderungen im Bereich der Bau- und Prozessorganisation für diesen Bereich erfasst. Auf verschiedenen baulichen Betrachtungsebenen von Funktionsstellenbeziehungen bis hin zum Detail werden die Anforderungen an die Lösungsstrategien für die Bewegungsmuster der unterschiedlichen Prozesse, differenziert nach Menschen (Patient/Behandler), Material/Güter und TGA bzw. RLT (Raum-Luft-Technik, hier in Abstimmung mit Projektpartner TU und FU Berlin), Weg/Prozess der Infektion etc., ermittelt und abgeleitet. Diese in einem Anforderungskatalog gemündeten Ergebnisse liefern die Grundlage für die Entwicklung einer baulichen Musterlösung eines Sonder-Isolierbereiches eines Schwerpunktkrankenhauses. Im letzten Schritt wird die Musterlösung auf Implementierung in Bestands- und Neubauten von Krankenhäusern überprüft.

4.4.5 BIPROC

Verbundvorhaben

Entwicklung eines Klassifikationssystems zur baulichen Infektionsprävention auf Grundlage neuer epidemiologischer Erkenntnisse / **Building Infection Protection Classification** (Hans-Knöll-Institut 2017)

Projektpartner

- Institut für Industriebau und Konstruktives Entwerfen, TU Braunschweig
- Institut für Epidemiologie, Friedrich-Loeffler-Institut, Greifswald – Insel Riems

Gesamtziele des Verbundvorhabens

Das Ziel von BIPROC ist es, Gebäude- und Infrastruktursysteme aus infektionsprophylaktischer Sicht in eindeutige standardisierte Klassen einzuordnen. Die Planer solcher Infrastrukturen sollen bei der Wahl der Maßnahmen zur baulichen Infektionsprävention durch diese Klassifikation unterstützt werden. Eine vergleichbare Form der Klassifikation im Bau wäre die Brandschutzklasse oder Energieeffizienzklasse. Eine anschließende Zertifizierung von Gebäude- und Infrastruktursystemen auf Grundlage des zu entwickelnden Klassifikationsmodells würde die Leitgedanken von InfectControl 2020 weiterführen.

Der Brückenschlag zum Bereich Landwirtschaft und Veterinärmedizin stellt ein wichtiges Gesamtziel dieses Projektes dar. Das Klassifikationssystem soll im Bereich Landwirtschaft entwickelt werden und praxisnah mithilfe einer Implementierungsstrategie auf seine Anwendungsfähigkeit überprüft werden.

Das beschriebene Ziel soll durch drei Arbeitsschwerpunkte erreicht werden. Im ersten Arbeitsschwerpunkt 1 soll die aktuelle Ist-Situation aus bauprozessplanerischer und epidemiologischer Sicht erfasst werden (relevante Gebäude- und Infrastruktursysteme, Standards, Infektionsquellen, -träger, -zeiträume, Übertragungswege). Anschließend soll im Arbeitsschwerpunkt 2 aus diesen Erkenntnissen ein Kriterienkatalog zur Bewertung und Einordnung der Gebäudetypologie aus infektionspräventiver Sicht entwickelt und ein Klassifikationsmodell erstellt werden. Im letzten Arbeitsschwerpunkt 3 wird die Anwendungsfähigkeit des entwickelten Klassifikationsmodells an Hand einer Machbarkeitsstudie untersucht.

Arbeitsziele des Verbundes

Im Arbeitsschwerpunkt 1 „**Basisperiode: Erfassung IST-Situation**“ sollen zunächst aus baulicher Sicht die relevanten Gebäude und Infrastruktursysteme im Bereich Landwirtschaft erfasst werden. Ebenso sollen die bestehenden Standards zur baulichen In-

fektionsprävention dieser Gebäudetypologien strukturiert erfasst und aufbereitet werden. Aus epidemiologischer Sicht sollen in diesem Arbeitsschwerpunkt die möglichen Infektionsquellen und Infektionsträger der Gebäude- und Infrastruktursysteme erfasst werden. Zudem werden die relevanten Infektionszeiträume definiert. Im dritten Schritt werden die möglichen Übertragungswege für Infektionskrankheiten der betrachteten Systeme erfasst.

Einen zentralen Bestandteil des Verbundvorhabens stellt der Arbeitsschwerpunkt 2 „**Entwicklungsperiode: Entwicklung Kriterienkatalog, Klassifikationsmodell/Index**“ dar. Hier sollen zunächst andere Klassifikationsmodelle gesichtet und bewertet werden, um ihre mögliche Ableitung und Passfähigkeit eines Klassifikationsmodells zur baulichen Infektionsprävention zu überprüfen. Im engen transsektoralen Ansatz soll im AS 2 ein Kriterienkatalog entwickelt werden, der eine Einordnung der unterschiedlichsten Gebäude- und Infrastrukturtypologien in ein Klassifikationsmodell möglich macht. Mögliche Kriterien könnten hierbei z. B. das Gebäudeprofil (Verhältnis Nutzer zu Fläche, Oberflächen, infektionskritische Bereiche, etc.), das Nutzerprofil (Nutzerzusammensetzung, Überträgerwechselrate, etc.) oder auch die Quantität und Qualität der infektionsrelevanten Vorschriftenlage (Hygienevorschriften nach Infektionsschutzgesetz, Arbeitsschutz, Tiergesundheitsgesetz, Viehverkehrsverordnung, Schweinehaltungshygieneverordnung etc.) sein.

Im abschließenden Arbeitsschwerpunkt „**Entwicklung einer Implementierungsstrategie, Proof of Concept**“ soll die Anwendungsfähigkeit des entwickelten Klassifikationsmodells an Hand einer Machbarkeitsstudie (Proof of Concept) untersucht werden. Dabei soll zunächst eine Implementierungsstrategie entwickelt werden, in der u. a. die Methodik, der zeitliche und örtliche Rahmen, die Dokumentationsform und die Art der Nutzereinbindung definiert werden. Die Überprüfung des Klassifikationsmodells wird an ausgewählten gebauten Beispielen sowie an aktuellen Entwurfskonzepten im Bereich der Landwirtschaft erfolgen. Auf der Grundlage dieser Erkenntnisse wird in einem weiteren Arbeitsschritt das Klassifikationsmodell angepasst und optimiert.

Teilvorhaben TV 1 – Bereich Bau

Entwicklung eines Klassifikationssystems im Bereich Landwirtschaft aus baulich-funktionaler Sicht

Gesamtziel des Teilvorhabens 1

In diesem **Teilvorhaben TV 1** wird das Klassifikationsmodell im Bereich Landwirtschaft aus baulich-funktionaler Sicht entwickelt und in einem weiteren Schritt auf Ihre Nutzungstauglichkeit überprüft.

Das Projekt BIPROC soll die bereits unter dem Dach von InfectControl 2020 bestehenden Projekte (u. a. HYSYSTEM TFP, KARMIN, EKOS, HYFLY) vernetzen, Synergien

aufgreifen und Zwischenergebnisse / Ergebnisse zusammenführen. Dadurch bietet sich die einmalige Chance, das Thema der baulichen Infektionsprävention ganzheitlich zu betrachten und das angestrebte Ziel der Entwicklung eines Klassifikationssystems in diesem Bereich zu unterstützen. Gemeinsam mit dem Verbundpartnern Friedrich-Loeffler-Institut, Bundesforschungsinstitut für Tiergesundheit (FLI) sowie den beratenden Partnern des Robert Koch-Institutes (RKI) und des Bundesinstitutes für Risikobewertung (BfR) wird das Klassifikationssystem sowohl aus bauprozessplanerischer als auch aus epidemiologischer Sicht erarbeitet und entwickelt.

Arbeitsziele des Teilvorhabens 1

Im **Arbeitsschwerpunkt 1** werden zunächst relevante Gebäude- und Infrastruktursysteme im Bereich Landwirtschaft erfasst. Anhand einer umfassenden Literaturrecherche zu allen wesentlichen baulichen Komponenten (z. B. Konstruktion, Ausstattung, Material), der Analyse von Bewegungsmuster unterschiedlicher Nutztiergruppen sowie dem intensiven Wissensaustausch mit allen beteiligten Projektpartnern (z. B. durch Workshops und Ideenbörsen) sollen bauliche Schnittstellen und Bewegungsströme unter infektionskritischen Gesichtspunkten identifiziert und bewertet werden. In **AP2** wird zudem eine Recherche zu hygienerelevanten Vorschriften, Richtlinien und wissenschaftlichen Veröffentlichungen im Bereich der baulichen Infektionsprävention sowie zu relevanten Klassifikationssystemen in der baulichen Infektionsprävention (wie z. B. Reinraum-Klassifikation, biologische Sicherheitsstufe (S1-S4), biologische Arbeitsstoffe oder RKI Empfehlungen) wichtige Hinweise für die Entwicklung eines Klassifikationssystems geben.

Im **Arbeitsschwerpunkt 2** wird das Klassifikationsmodell der baulichen Infektionsprävention für den Bereich Landwirtschaft mit den beteiligten Projektpartnern entwickelt. Auf Grundlage der bauwissenschaftlichen Analyse des vorangegangenen Arbeitsschwerpunktes werden zunächst andere bauliche Klassifikationsmodelle (z. B. Brandschutzklassen, Energieeffizienzklassen) auf ihre strukturellen Merkmale und ihre Passfähigkeit für ein Klassifikationssystem der baulichen Infektionsprävention geprüft. In einem nächsten Schritt wird ein Kriterienkatalog zur Bewertung von Anforderungsspezifikationen erstellt. Hier werden relevante Kriterien im Bereich der baulichen Infektionsprävention definiert, formuliert und auf ihre Vollständigkeit und Validität überprüft. Anforderungskriterien können z. B. das Gebäudeprofil in Bezug zur Höhe der Nutzerrate oder das Nutzerprofil in Bezug zur Höhe der Überträgerwechselrate sein. Insbesondere der enge und kontinuierliche Austausch und Wissensabgleich mit dem FLI und den weiteren wissenschaftlichen Partnern zu epidemiologischen Fragestellungen ist von herausragender Bedeutung. Das nächste Arbeitspaket beinhaltet die Entwicklung des Klassifikationsmodells zur baulichen Infektionsprävention für den Bereich Landwirtschaft. Dies beinhaltet die Definition relevanter Klassen auf der Grundlage des zuvor entwickelten Kriterienkataloges und die Erstellung einer erweiterungsfähigen

und anwendungstauglichen Klassifikationsstruktur. Die Überprüfung des Systems auf Vollständigkeit und Validität erfolgt unter Beteiligung der Projektpartner.

Der **Arbeitsschwerpunkt 3** untersucht die Anwendungsfähigkeit des entwickelten Klassifikationsmodells an Hand einer Machbarkeitsstudie (Proof of Concept). Dabei soll zunächst mit den Projektpartnern eine Implementierungsstrategie entwickelt werden, in der u. a. die Methodik, der zeitliche und örtliche Rahmen, die Dokumentationsform und die Art der Nutzereinbindung definiert werden. Die Überprüfung des Klassifikationsmodells wird an ausgewählten gebauten Beispielen sowie an aktuellen Entwurfskonzepten im Bereich der Landwirtschaft erfolgen.

4.4.6 Ausblick

Die vier in der Umsetzungsphase befindlichen Projekte, die gerade beschrieben wurden, zeichnen sich bereits durch eine transsektorale Zusammensetzung der Forschungsteams und seiner eingesetzten Methoden aus. Die in dieser vorgelegten Arbeit herausgearbeiteten methodischen Möglichkeiten gehen aber noch darüber hinaus. Besonders der Einsatz von digitalen Methoden wie der Modellierung, Kartierung und Datenbankennutzung sollte weiter vorangetrieben werden. Für solch ein mögliches Szenario soll eine Projektstrategie exemplarisch dargestellt werden. Diese befindet sich wiederum im Bereich des Gesundheitsbaus, da hier kontrollierte Studiensettings aufgesetzt werden können. Folgende Skizze zu einer Interventionsstudie zeigt die Möglichkeiten in diesem Bereich, bauliche Maßnahmen zur Infektionsprävention nicht evidenz-basiert, sondern evidenz-basiert zu überprüfen.

Interventionsstudie

Um zu überprüfen, wie effektiv bauliche Konzepte die Übertragung nosokomialer Infektionen in der Praxis einschränken können, sind rigoros durchgeführte Studien zur Evidenzgenerierung notwendig. Die Evaluation der Rolle baulicher Maßnahmen für die Übertragung nosokomialer Infektionen im komplexen Umfeld dynamischer Krankenhausprozesse ist allerdings nur eingeschränkt möglich. Randomisierte Studien, welche die Wirkung alternativer baulicher Umsetzungen unverzerrt testen könnten, sind aus finanziellen und praktischen Gründen nicht umsetzbar.

Eine gute Alternative bieten hier Simulationsstudien auf Basis der mathematischen Modellierung, welche in der Infektionsepidemiologie seit vielen Jahren erfolgreich in vergleichbaren Fragestellungen eingesetzt werden.

Innovativer Ansatz / Alleinstellungsmerkmal

Bei dieser skizzierten Interventionsstudie wird in interdisziplinärer Zusammenarbeit zwischen Architekten, Infektionsepidemiologen und klinischen Mikrobiologen erst-

mals eine Simulationsplattform entwickelt, anhand derer der Effekt baulicher Maßnahmen auf die Ausbreitung verschiedener nosokomialer Infektionen abgeschätzt werden kann, um darauf aufbauend eine infektionsepidemiologisch optimale Intensivstation zu entwerfen. Hierfür werden in einem ersten Schritt auf Basis von Daten aus Krankenhausinformationssystemen die Abläufe innerhalb einer Intensivstation mittels agenten-basierter Netzwerkmodellierung simuliert.

Zeitgleich werden anhand einer vorgeschalteten Beobachtungsstudie bauliche Faktoren identifiziert, welche potentiell die Ausbreitung nosokomialer Infektionen auf Intensivstationen eindämmen können. Diese baulichen Maßnahmen werden in interdisziplinärer Zusammenarbeit dann in Rahmenparameter für die Netzwerkmodellierung übersetzt und in das entwickelte Modell implementiert. In umfassenden Simulationsstudien wird der Effekt der verschiedenen baulichen Maßnahmen (einzeln und in Kombination) auf das Auftreten nosokomialer Übertragungsereignisse auf Intensivstationen evaluiert. Hierbei werden zahlreiche Sensitivitätsanalysen durchgeführt, die zeigen, wie stabil die ermittelten Ergebnisse gegenüber lokalen Unterschieden in Abläufen bzw. nicht veränderbaren räumlichen Voraussetzungen sind. Die Ergebnisse der Simulationsstudien werden dann genutzt, um ein architektonisches Konzept für eine aus Infektionspräventionssicht optimale Intensivstation zu entwickeln, welche zusätzlich bestehende bauliche Grundkonzepte erfüllt.

Hierbei werden erstmalig evidenzbildende Methoden aus der quantitativen Gesundheitsforschung für die Evaluierung des Effekts baulicher Konzepte auf gesundheitsrelevante Endpunkte herangezogen. Bisherige Prozesse zur Auswahl baulicher Konzepte im Krankenhausbau basieren ausschließlich auf Expertenmeinungen, so dass das vorliegende Projekt nicht nur hohes Innovationspotential besitzt, sondern auch ein wesentliches Alleinstellungsmerkmal aufweist.

Ziele

Übergeordnetes Ziel des vorgestellten Vorhabens ist die Entwicklung eines architektonischen Konzepts für eine Intensivstation, die auf empirisch nachgewiesener Wirksamkeit basiert und bestmöglich die Vermeidung der Ausbreitung nosokomialer Infektionen berücksichtigt. Dies schließt drei praktische Ziele ein.

Die **Entwicklung einer Simulationsplattform** zur evidenz-basierten Evaluation des Effektes baulicher Maßnahmen auf die Ausbreitung nosokomialer Infektionen auf Intensivstationen basierend auf einer **agenten-basierten Netzwerkmodellierung**.

Die **evidenz-basierte Überprüfung** von in Vorstudien identifizierten **baulichen Maßnahmen**, welche potentiell zur Eindämmung nosokomialer Infektionsübertragungen auf Intensivstationen geeignet sind.

Die **Entwicklung eines architektonischen Konzepts** für eine Intensivstation, welcher die identifizierten baulichen Maßnahmen kostengünstig umsetzt und technisch praktikabel bestehende Baukonzepte für Intensivstationen optimiert.

Schlussbetrachtung und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurde eine Strategie entworfen, um die Infektionsprävention durch bauliche Maßnahmen mit einem ganzheitlichen Ansatz zu entwickeln. Um zunächst die Grundzüge der Wechselwirkung von Infektionsketten und baulichen Komponenten zu verstehen, wurden durch die Darstellung der Infektionsübertragungswege auf Grundlage der Erkenntnisse der Epidemiologie relevante Faktoren im Zusammenspiel von Infektionsausbreitung und baulichen Aspekten analysiert. Die hieraus abgeleiteten baulichen Komponenten konnten in zwei Hauptgruppen der für die Infektionsprävention zu optimierenden Baukomponenten gegliedert werden. So konnte gezeigt werden, dass die bautechnisch-konstruktiven Komponenten wie z. B. Materialien und Gebäudetechnik überwiegend für die Prävention der indirekten Infektionsübertragungen über Vehikel wie Oberflächen, Wasser oder Nahrungsmittel eingesetzt werden können. Für die direkte Infektionsübertragung im Direktkontakt der Berührung oder der Tröpfcheninfektion sind überwiegend die baufunktional-prozessualen Baukomponenten, wie z. B. die ablaufprozessoptimierte Planung zur Entflechtung der Wegeüberlagerung bzw. Kreuzkontamination, zur Prävention zielführend.

Die Darstellung der bereits etablierten Methoden des Bauens zur Infektionsreduzierung haben gezeigt, dass heutzutage nahezu alle baufunktional-prozessualen Methoden der Infektionsprävention zur Wegeentflechtung, Distanzwahrung, Separation oder Isolation in räumlich zugangskontrollierten Bereichen wie dem Laborbau, speziellen Bereichen des Gesundheitsbaus, der Großküchen oder der Lebensmittelproduktion stattfindet. Die Barrierewirkung wird dabei durch Flächenzuweisung bzw. Nutzflächentrennung wie der Schwarz-Weiß- oder Rot-Gelb-Grün-Trennung realisiert. Dem gegenüber stellt die Reduzierung des Infektionsrisikos im Bereich der öffentlichen Bauten eine große Herausforderung dar. Neue baufunktional-prozessuale Barriereformen müssen für diesen Bereich entwickelt werden, um eine Entflechtung der Wegeüberlagerungen bzw. eine gerichtete Wegeführung zu erreichen.

Um diese neuen Ansätze im komplexen Themenfeld der raum-zeitlich verorteten Infektionsketten methodisch und inhaltlich anzureichern, wurden Experteninterviews durchgeführt. Im Ergebnis kamen bei den Gesprächen mit Experten aus den Bereichen Risikobewertung, Surveillance, spezielle Pathogene, epidemiologische und statistische Methoden etc. entscheidende Hinweise zu den Bereichen wie z. B. der menschlichen Bewegungsmusterbeschreibung im Ansatz der Anthropologie, Soziologie, Psychologie oder zu den Methoden der computergestützten Simulationsmodelle heraus. Die vertiefende Literaturrecherche, Aufarbeitung und Exaptation der Erkenntnisse und Methoden dieser Themen, wie z. B. die Definition von Distanz, Raumnutzungsverhalten, Grup-

pendynamik, Crowding, Orientierung, kulturelle Unterschiede in der Wahrnehmung oder Verhaltensökonomie, konnten wichtige Impulse und neue transsektorale Blickwinkel für die darauf aufbauende bauliche Infektionspräventionsstrategie geben.

Aufgrund der hohen Komplexität der Herausforderung der baulichen Infektionsprävention und der damit einhergehenden Vielzahl an teilweise unscharf definierten Lücken im Handlungsverlauf des Problemlösungsprozesses musste der Ansatz zur Kontrolle der Infektionskette transsektoral, vielfältig und skalenübergreifend sein. Die kombinierte Multi-Skalen-Barrieren-Strategie setzt sich hierbei aus mehreren Komponenten auf unterschiedlichen Betrachtungsebenen und –Größen zusammen. Grundlage ist die bautechnisch-konstruktive Weiterentwicklung und baufunktional-prozessuale Optimierung ausgesuchter Baukomponenten durch die Entwicklung neuer transsektoraler Methoden. Beispielhaft soll hier die planerische Formoptimierung mithilfe der computergestützten, durch epidemiologische Datenerhebung angereicherte Mikrosimulationsmodelle genannt werden. Des Weiteren sieht die Strategie die Weiterentwicklung der Metabetrachtung durch die Optimierung der Planungssystematik und Entwicklung einer Gebäudeklassifikation unter infektionspräventiven Kriterien vor.

Abschließend wurden bereits entwickelte Forschungsansätze vorgestellt, die zeitgleich mit der Erstellung der vorgelegten Arbeit vom Verfasser mit entwickelt wurden. Diese zeigen bereits das Potential im Bereich der kombinierten Multi-Skalen-Barrieren-Strategie auf. Das Ziel der Transsektoralen-Forschungs-Plattform des InfectControl 2020 Konsortiums (Kurczai et al. 2016), neue Projekte aus der Grundlagenarbeit dieser vorgelegten Dissertation hervorzubringen, konnte ebenfalls mit diesen Projekten gezeigt werden.

Die bauliche Infektionsprävention steht gerade im aufgezeigten Bereich der öffentlichen Bauten noch am Anfang ihrer vielfältigen Möglichkeiten. Der weitere Forschungsbedarf auch im Hinblick auf die Themenbrisanz der Infektionen ist damit mehr als gegeben. Gerade das Verstehen der vermeintlich einfachen Zusammenhänge von Ursachen und Wirkungen muss im Bereich der baulichen Infektionsprävention aufgrund der komplexen Wechselwirkungen von Infektionsketten und Baukomponenten weiterhin an erster Stelle stehen. Die vorgelegte Arbeit stellt mit ihrer Strategie, im Besonderen der ausgesuchten Baukomponenten und transsektoralen Methoden, quasi einen Baukasten zur Verfügung, um in unterschiedlicher Kombination dieser Elemente eine Vielzahl an neuen Forschungsstudien im Sinne der baulichen Infektionspräventionsstrategie zu entwickeln.

Quellen

Gesprächspartner Interviews

Interview am 22.03.2016, 11:00 Uhr

Dr. Niels **Bandick**

Bundesinstitut für Risikobewertung (BfR), Berlin

Fachgruppe Lebensmitteltechnologische Verfahren, Warenketten und Produktschutz, Abteilung Biologische Sicherheit

PD Dr. Bernd-Alois **Tenhagen**

Bundesinstitut für Risikobewertung (BfR), Berlin

Fachgruppe Epidemiologie, Zoonosen und Antibiotikaresistenzen, Abteilung Biologische Sicherheit

Interview am 29.03.2016, 14:00 Uhr

Dr. Andreas **Gilsdorf**

Robert Koch Institut (RKI), Berlin
Fachgruppe 32 – Surveillance

Interview am 29.03.2016, 15:00 Uhr

Dr. Christian **Herzog**

Robert Koch Institut (RKI), Berlin
IBBS – Informationsstelle des Bundes für Biologische Gefahren und Spezielle Pathogene

Interview am 26.04.2016, 10:00 Uhr

Dr. André **Karch**

Helmholtz Zentrum für Infektionsforschung (HZI), Braunschweig
Epidemiologische und statistische Methoden

Interview am 04.07.2016, 13:00 Uhr

Prof. Dr. Dirk **Brockmann**

Humboldt Universität Berlin
Institut für theoretische Biologie (ITB)
Robert Koch Institut (RKI), Berlin
PG4: Epidemiologische Modellierung von Infektionskrankheiten

Interview am 06.09.2016, 11:30 Uhr

Prof. Dr. med Thomas **Kistemann** MA

(geogr.)

IHPH - Institut für Hygiene und Öffentliche Gesundheit/Public Health

GeoHealth Centre, AG Health GIS | Geostatistik, Universität Bonn

WHO CC for Health Promoting Water Management and Risk Communication

Dr. med. Peter **Schmitz**

GeoHealth Centre

IHPH - Institut für Hygiene und Öffentliche Gesundheit/Public Health, Universität Bonn

Literaturverzeichnis

- ABAS (Hg.) (2016): Schutzmaßnahmen für Tätigkeiten außerhalb von Sonderisolierstationen bei der Versorgung von Patienten, die mit hochpathogenen Krankheitserregern infiziert oder krankheitsverdächtig sind. Beschluss 610. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (42).
- Alexander, Kathleen A.; Sanderson, Claire E.; Marathe, Madav; Lewis, Bryan L.; Rivers, Caitlin M.; Shaman, Jeffrey et al. (2015): What factors might have led to the emergence of Ebola in West Africa? In: *PLoS neglected tropical diseases* 9 (6), e0003652. DOI: 10.1371/journal.pntd.0003652.
- Altman, Irwin (1975): The environment and social behavior. Privacy, personal space, territory, crowding. Monterey, Calif.: Brooks/Cole Publ.
- Altman, Irwin; Wohlwill, Joachim F. (Hg.) (1983): Behavior and the natural environment. New York, NY: Plenum Press (Human behavior and environment, 6).
- Antonovsky, Aaron (1979): Health, stress, and coping. San Francisco: Jossey-Bass (The Jossey-Bass social and behavioral science series).
- Antonovsky, Aaron (1987): Unraveling the mystery of health. How people manage stress and stay well. 1. ed. San Francisco: Jossey-Bass (The Jossey-Bass health series).
- ARGEBAU (2002): Planung und Bau von Küchen und Kantinen für 50 bis 1000 Verpflegungsteilnehmer. Ausschuss für staatlichen Hochbau. Bauministerkonferenz.
- ARL (2014): Umwelt- und Gesundheitsaspekte im Programm Soziale Stadt. Ein Plädoyer für eine stärkere Integration. Hannover: Verl. der ARL (Positionspapier aus der ARL / Akademie für Raumforschung und Landesplanung, 97). Online verfügbar unter <http://hdl.handle.net/10419/102796>.
- Ashford, N.; O'Leary, M.; McGinity (1976): Stochastic modelling of passenger and baggage flows through an airport terminal. In: *Traffic Engineering & Control*, S. 207–210.
- Atkinson, John W. (1964): An introduction to motivation. 7. [print]. New York: Van Nostrand.
- Bahrdt, Hans Paul (1961): Die moderne Gesellschaft. Soziologische Überlegungen zum Stadtebau. Reinbek bei Hamburg: Rowohlt Taschenbuch

- (Rowohlt deutsche Enzyklopadie, Band 127).
- Bahrddt, Hans Paul; Herlyn, Ulfert (Hg.) (1998): Die moderne Großstadt. Soziologische Überlegungen zum Städtebau. Opladen: Leske + Budrich.
- Barker, Roger G. (1968): Ecological psychology. Concepts and methods for studying the environment of human behavior. [Nachdr.]. Stanford, Calif.: Stanford Univ. Pr.
- Barker, Roger G. (1978): Habitats, environments, and human behavior. Studies in ecological psychology and eco-behavioral science from the Midwest Psychological Field Station, 1947-1972. 1st ed. San Francisco, Calif.: Jossey-Bass (The Jossey-Bass social and behavioral science series).
- Barker, Roger G. (1987): Prospecting in environmental psychology, Oslo revisited. In: Daniel Stokols und Irwin Altman (Hg.): Handbook of environmental psychology. New York: Wiley, S. 1413-1432.
- Baron, R.; Rodin, J. (1978): Personal Control and crowding stress: Processes mediating the impact of spatial and social density. In: Andrew Baum (Hg.): Advances in environmental psychology. Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Baskaya, Aysu; Wilson, Christopher; Özcan, Yusufziya (2004): Wayfinding in an Unfamiliar Environment. Different Spatial Settings of Two Polyclinics. In: *Environment and Behavior* 36 (6), S. 839-867. DOI: 10.1177/0013916504265445.
- Baum, Andrew; Davis, Glenn E. (1980): Reducing the stress of high-density living. An architectural intervention. In: *Journal of Personality and Social Psychology* 38 (3), S. 471-481. DOI: 10.1037//0022-3514.38.3.471.
- Baum, Andrew; Paulus, P. B. (1991): Crowding. In: Daniel Stokols (Hg.): Handbook of environmental psychology. Reprint ed. Malabar, Fla.: Krieger.
- Baum, Andrew; Valins, Stuart (1977): Architecture and social behaviour. Psychological studies of social density, by Andrew Baum, Stuart Valins. Hillsdale, N.J.: L. Erlbaum Associates.
- Beauchemin, Kathleen M.; Hays, Peter (1996): Sunny hospital rooms expedite recovery from severe and refractory depressions. In: *Journal of affective disorders* 40 (1-2), S. 49-51. DOI: 10.1016/0165-0327(96)00040-7.
- Bengel, Jürgen; Strittmatter, Regine; Willmann, Hildegard (1998): Was erhält den Menschen gesund? Antonovskys Modell der Salutogenese - Diskussionsstand und Stellenwert; eine Expertise. Köln: BZgA (Forschung und Praxis der Gesundheitsförderung, 6).
- Berliner BPM-Offensive (Hg.) (2016): BPMN 2.0 - Business Process Model and Notation. Online verfügbar unter

- http://www.bpm.b.de/images/BPM_N2_0_Poster_DE.pdf, zuletzt geprüft am 05.09.2017.
- BfR (2017a): BfR-Produktschutz Checkliste. Bundesinstitut für Risikobewertung. Online verfügbar unter http://www.bfr.bund.de/de/bfr_produktschutz_checkliste-190348.html, zuletzt geprüft am 30.11.2017.
- BfR (Hg.) (2017b): FoodChain-Lab. Bundesinstitut für Risikobewertung. Online verfügbar unter https://foodrisklabs.bfr.bund.de/foodchain-lab_de/, zuletzt aktualisiert am 04.07.2017.
- BfR (Hg.) (2017c): FoodProcess-Lab. Bundesinstitut für Risikobewertung. Online verfügbar unter https://foodrisklabs.bfr.bund.de/foodprocess-lab_de/, zuletzt geprüft am 04.07.2017.
- BfR (2017d): FoodRiskLabs. Hg. v. Bundesinstitut für Risikobewertung. Online verfügbar unter <https://foodrisklabs.bfr.bund.de/frl/>, zuletzt geprüft am 30.11.2017.
- BfR (Hg.) (2017e): Predictive Microbial Modeling Lab (PMM-Lab). Bundesinstitut für Risikobewertung. Online verfügbar unter https://foodrisklabs.bfr.bund.de/pmm-lab_de/, zuletzt aktualisiert am 04.07.2017.
- Bill, Ralf (2010): Grundlagen der Geo-Informationssysteme. Berlin: Wichmann.
- Bonita, Ruth; Beaglehole, Robert; Kjellström, Tord (2013): Einführung in die Epidemiologie. 3., korrigierte Aufl. Bern: Verlag Hans Huber (Verlag Hans Huber : Programmbereich Gesundheit).
- Borgers, A.; Timmermans, H. J.P. (1986a): City centre entry points, store location patterns and pedestrian route choice behaviour. A microlevel simulation model. In: *Socio-Economic Planning Sciences* 20 (1), S. 25–31. DOI: 10.1016/0038-0121(86)90023-6.
- Borgers, Aloys; Timmermans, Harry J. P. (1986b): A model of pedestrian route choice and demand for retail facilities within inner-city shopping areas. In: *Geographical analysis : an international journal of theoretical geography*.
- Boyce, Alice; Wethington, Elaine; Moen, Phyllis (2003): Continuity and change in subjective well-being. In: Residential choices and experiences of older adults : pathways to life quality. New York, NY, New York: Springer, S. 177–193.
- Brandt, Christian; Hott, Uwe; Sohr, Dorit; Daschner, Franz; Gastmeier, Petra; Rüden, Henning (2008): Operating room ventilation with laminar airflow shows no protective effect on the surgical site infection rate in orthopedic and abdominal surgery. In: *Annals of Surgery* 248 (5), S. 695–700. DOI: 10.1097/SLA.0b013e31818b757d.

- Braun, W. (2005): Leben wie ein Kampfpilot. In: *Psychologie heute* 6 (10).
- Breier, Ann Christin; Brandt, Christian; Sohr, Dorit; Geffers, Christine; Gastmeier, Petra (2011): Laminar airflow ceiling size. No impact on infection rates following hip and knee prosthesis. In: *Infect Control Hosp Epidemiol* 32 (11), S. 1097–1102. DOI: 10.1086/662182.
- Brockmann, D. (2008): Anomalous diffusion and the structure of human transportation networks. In: *Eur. Phys. J. Spec. Top.* 157 (1), S. 173–189. DOI: 10.1140/epjst/e2008-00640-0.
- Brockmann, Dirk (2014): 2014 Ebola Outbreak: Worldwide Air Transportation and Relative Import Risk. Online verfügbar unter <http://rocs.hu-berlin.de/D3/ebola/>, zuletzt aktualisiert am 04.07.2017.
- Brockmann, Dirk (2016): Forschungsschwerpunkte der Projektgruppe P 4: Epidemiologische Modellierung von Infektionskrankheiten am RKI. Robert Koch-Institut (RKI). Online verfügbar unter http://www.rki.de/DE/Content/Forsch/Projektgruppen/Projektgruppe_4/P4_node.html.
- Brockmann, Dirk (2017): Dynamik und Ausbreitung von Infektionserkrankungen in einer globalisierten, vernetzten Welt. In: Jobst Augustin und Daniela Koller (Hg.): *Geografie der Gesundheit. Die räumliche Dimension von Epidemiologie und Versorgung*. 1. Auflage. Bern: Hogrefe, S. 255–267.
- Brockmann, Dirk; Helbing, Dirk (2013): The hidden geometry of complex, network-driven contagion phenomena. In: *Science (New York, N.Y.)* 342 (6164), S. 1337–1342. DOI: 10.1126/science.1245200.
- Brockmann, Dirk; Schaade, Lars; Verbeek, luzie (2014): 2014 Ebola Outbreak: Worldwide Air-Transportation, Relative Import Risk and Most Probable Spreading Routes. Robert Koch Institut; Institute for Theoretical Biology, Berlin, Germany; Northwestern Institute on Complex Systems, Northwestern University, Evanston, USA. Online verfügbar unter <http://rocs.hu-berlin.de/publications/ebola/index.html>, zuletzt aktualisiert am 04.07.2017.
- Bundesverband der Deutschen Luftverkehrswirtschaft (BDL) (Hg.) (2016): *Jahreszahlen zur Lage der Luftfahrt 2015*.
- Byrne, Michael D.; Bovair, Susan (1997): A working memory model of a common procedural error. In: *Cognitive Science* 21 (1), S. 31–61. DOI: 10.1207/s15516709cog2101_2.
- Campbell-Lendrum, Diarmid; Bertollini, Roberto; Neira, Maria; Ebi, Kristie; McMichael, Anthony (2009): Health and climate change. A roadmap for applied research. In: *The Lancet* 373 (9676), S. 1663–1665. DOI: 10.1016/S0140-6736(09)60926-0.

- Castillo-Chavez, Carlos; Curtiss, Roy; Daszak, Peter; Levin, Simon A.; Patterson-Lomba, Oscar; Perrings, Charles et al. (2015): Beyond Ebola: lessons to mitigate future pandemics. In: *The Lancet. Global health* 3 (7), e354-5. DOI: 10.1016/S2214-109X(15)00068-6.
- Cattuto, Ciro; Lehmann, Sune; Neher, Richard; Pybus, Oliver; Salathe, Marcel; Vespignani, Alessandro (2017): Robert Koch Colloquium "Digital Epidemiology". Abstracts. Robert Koch-Institut (RKI). Online verfügbar unter http://www.rki.de/DE/Content/Service/Veranstaltungen/rkc_2017_Abstracts.html, zuletzt geprüft am 29.08.2017.
- Claßen, Thomas (2017): Bebaute Umwelt und Gesundheit. In: Jobst Augustin und Daniela Koller (Hg.): *Geografie der Gesundheit. Die räumliche Dimension von Epidemiologie und Versorgung*. 1. Auflage. Bern: Hogrefe, S. 192–205.
- Cliff, A. D.; Haggett, Peter; Smallman-Raynor, Matthew (2000): *Island epidemics*. Oxford [England], New York: Oxford University Press (Oxford geographical and environmental studies).
- Cohen, S. (1978): Environmental load and the allocation of attention. In: Andrew Baum (Hg.): *Advances in environmental psychology*. Hillsdale, NJ: Erlbaum, S. 1–29.
- Colizza, Vittoria; Barrat, Alain; Barthélemy, Marc; Valleron, Alain Jacques; Vespignani, Alessandro (2007): Modeling the worldwide spread of pandemic influenza. Baseline case and containment interventions. In: *PLoS Medicine* 4 (1), S. 95–110. DOI: 10.1371/journal.pmed.0040013.
- Cooper, Matthew A.; Shlaes, David (2011): Fix the antibiotics pipeline. In: *Nature* 472 (7341), S. 32. DOI: 10.1038/472032a.
- Cromley, E. K. (2012): The Role of the Map and Geographic Information Library in Medical Geographic Research. In: Amy J. Blatt (Hg.): *Perspectives in Medical Geography. Theory and Applications for Librarians*. London: Taylor and Francis, S. 13–35.
- Dannenberg, Andrew L.; Frumkin, Howard; Jackson, Richard J. (Hg.) (2011): *Making healthy places. Designing and building for health, well-being, and sustainability*. Washington, DC: Island Press.
- Davis, Dennis G.; Braaksma, John P. (1988): Adjusting for luggage-laden pedestrians in airport terminals. In: *Transportation Research Part A: General* 22 (5), S. 375–388. DOI: 10.1016/0191-2607(88)90014-3.
- Deerberg, Gorge (2013): *Metallische Mikrosiebe zur spezifischen Abscheidung von Schadstoffen und Keimen aus Abgasen, Wasser und Lebensmitteln. Schlussbericht ; Laufzeit: 01.10.09 bis 31.03.2013*. Oberhausen, Hannover: Technische Informationsbibliothek u. Universi-

- tätsbibliothek. Online verfügbar unter <http://edok01.tib.uni-hannover.de/e-doks/e01fb14/798296321.pdf>.
- Desor, J. A. (1972): Toward a psychological theory of crowding. In: *Journal of Personality and Social Psychology* 21 (1), S. 79–83. DOI: 10.1037/h0032112.
- Dettenkofer, Markus; Wenzler, Sibylle; Amthor, Susanne; Antes, Gerd; Motschall, Edith; Daschner, Franz D. (2004): Does disinfection of environmental surfaces influence nosocomial infection rates? A systematic review. In: *American journal of infection control* 32 (2), S. 84–89. DOI: 10.1016/j.ajic.2003.07.006.
- DIN 1946-4 (2008): Raumluftechnik - Teil 4: Raumluftechnische Anlagen in Gebäuden und Räumen des Gesundheitswesens.
- DIN 4102-1 (1998): Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen - Teil 1: Baustoffe; Begriffe, Anforderungen und Prüfungen.
- DIN 4109 (2018): Schallschutz im Hochbau - Teil 1: Mindestanforderungen.
- DIN EN 15221-6 (2011): Facility Management - Teil 6: Flächenbemessung im Facility Management.
- DIN EN ISO 14644-1 (2015): Reinräume und zugehörige Reinraumbereiche - Teil 1: Klassifizierung der Luftreinheit anhand der Partikelkonzentration.
- Dios Ortúzar, Juan de; Willumsen, Luis G. (1990): *Modelling transport*. Chichester: Wiley.
- Domencich, Thomas A.; MacFadden, Daniel (1975): *Urban travel demand. A behavioral analysis ; a Charles River Associates research study*. Amsterdam: North-Holland Publ. Co ((Contributions to economic analysis, 93)).
- Dreßler, Inka; Budelmann, Harald; Holzhausen, Jan; Gastmeier, Petra; Roth, Carsten; Stiller, Andrea; Sunder, Wolfgang (2017): *HYBAU+ Forschungsprojekt Abschlussbericht. Bauliche Hygiene im Krankenhaus Leitfaden zur baulichen Entwicklung von Krankenhäusern aus hygienischen Gesichtspunkten - vom Gebäude bis zum Detail*. Hg. v. Institut für Industriebau und Konstruktives Entwerfen. TU Braunschweig.
- Driedger, S. Michelle; Kothari, Anita; Morrison, Jason; Sawada, Michael; Crighton, Eric J.; Graham, Ian D. (2007): Using participatory design to develop (public) health decision support systems through GIS. In: *International journal of health geographics* 6, S. 53. DOI: 10.1186/1476-072X-6-53.
- Ebihara, Manabu; Ohtsuki, Akira; Iwaki, Hideaki (1992): A Model for Simulating Human Behavior During Emergency Evacuation Based on Classificatory Reasoning and Certainty Value Handling. In: *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering* 7 (1), S. 63–71. DOI:

- 10.1111/j.1467-8667.1992.tb00417.x.
- Eco, Umberto (1977): Zeichen. Einführung in einen Begriff und seine Geschichte. Frankfurt M.: Suhrkamp (Edition Suhrkamp, 895).
- Eco, Umberto; Trabandt, Jürgen (1972): Einführung in die Semiotik. München: Fink (Theorie und Geschichte der Literatur und der schönen Künste, Bd. 32). Online verfügbar unter http://www.gbv.de/dms/faz-rez/731127_FAZ_0040_8_0002.pdf.
- EFSA (2014): Tracing of food items in connection to the multinational hepatitis A virus outbreak in Europe. In: *EFSA* 12 (9), S. 83. DOI: 10.2903/j.efsa.2014.3821.
- Elias, Norbert (1997): Über den Prozeß der Zivilisation. Soziogenetische und psychogenetische Untersuchungen ; Wandlungen der Gesellschaft ; Entwurf zu einer Theorie der Zivilisation. Frankfurt am Main: Suhrkamp (Gesammelte Schriften, ; 3.2).
- EN 13501-1 (2010): Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten - Teil 1: Klassifizierung mit den Ergebnissen aus den Prüfungen zum Brandverhalten von Bauprodukten.
- EnEV (2014): Energieeinsparverordnung. Bundesgesetzblatt Jahrgang 2013 Teil I Nr.67, ausgegeben am 21. November 2013.
- EU-GMP (2008): Anhang 1 zum EG-Leitfaden der Guten Herstellungspraxis. Herstellung steriler Arzneimittel. Anlage zur Bekanntmachung des Bundesministeriums für Gesundheit zu § 2 Nr. 3 der Arzneimittel- und Wirkstoffherstellungsverordnung vom 12. März 2008 (BAnz. S.1217).
- European Commission Communicable Disease Network (2009): The Commission of the European Communities: Commission Decision of 2 April 2009 amending Decision 2000/96/EC as regards dedicated surveillance networks for communicable diseases (notified under document number 2009/312/EC). Official Journal of the European Union 2009.
- Evans, Gary W. (1975): Behavioral and physiological consequences of crowding in humans. Unpublished doctoral dissertation, University of Massachusetts. [S.l.].
- Finke, Leonhard Ludwig (1792-95): Versuch einer allgemeinen medizinisch-praktischen Geographie. Worin der historische theil der einheimischen Völker- und Staaten-Arzeneykunde vorgetragen wird. Leipzig: Weidmann.
- Franck, Georg; Wegener, Michael (2002): Die Dynamik räumlicher Prozesse. In: Raumzeitpolitik. Opladen: Leske + Budrich, S. 145–162.
- Fraunhofer FEP (Hg.) (2017): Oberflächenmodifizierung für die Medizin-

- technik (D12). Online verfügbar unter https://www.fep.fraunhofer.de/content/dam/fep/de/documents/Produktflyer/D12_Oberflächenmodifizierung%20für%20die%20Medizintechnik_DE_net.pdf, zuletzt geprüft am 19.01.2018.
- Frieling, Ekkehart; Sonntag, Karlheinz (1999): Lehrbuch Arbeitspsychologie. 2., vollst. überarb. und erw. Aufl. Bern: Huber (Aus dem Programm Huber).
- Gastmeier, P.; Breier, A-C; Brandt, C. (2012): Influence of laminar airflow on prosthetic joint infections. A systematic review. In: *The Journal of hospital infection* 81 (2), S. 73–78. DOI: 10.1016/j.jhin.2012.04.008.
- Gebhard, Ulrich; Kistemann, Thomas (2016): Therapeutische Landschaften: Gesundheit, Nachhaltigkeit, "gutes Leben". Kap_1. In: Ulrich Gebhard und Thomas Kistemann (Hg.): Landschaft, Identität und Gesundheit. Zum Konzept der Therapeutischen Landschaften. Wiesbaden: Springer VS, S. 1–17.
- Geffers, Christine; Gastmeier, Petra; Rüden, Henning (Hg.) (2002): Nosokomiale Infektionen. Robert-Koch-Institut; Deutschland. Berlin: Robert Koch-Inst (Gesundheitsberichterstattung des Bundes, 8).
- GenTG (1990): Gentechnikgesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 16. Dezember 1993 (BGBl. I S. 2066), das zuletzt durch Artikel 3 des Gesetzes vom 17. Juli 2017 (BGBl. I S. 2421) geändert worden ist. Online verfügbar unter <https://www.gesetze-im-internet.de/gentg/BJNR110800990.html>.
- GenTSV: Gentechnik-Sicherheitsverordnung in der Fassung der Bekanntmachung vom 14. März 1995 (BGBl. I S. 297), die zuletzt durch Artikel 57 der Verordnung vom 31. August 2015 (BGBl. I S. 1474) geändert worden ist. Online verfügbar unter <http://www.gesetze-im-internet.de/gentsv/>.
- Gibson, James J. (1979): The ecological approach to visual perception. Boston: Houghton Mifflin.
- Gipps, P. G.; Marksjö, B. (1985): A micro-simulation model for pedestrian flows. In: *Mathematics and Computers in Simulation* 27 (2-3), S. 95–105. DOI: 10.1016/0378-4754(85)90027-8.
- Goffman, Erving; Wiggershaus, R. (1974): Das Individuum im öffentlichen Austausch. Mikrostudien zur öffentlichen Ordnung. 1. Aufl. Frankfurt am Main: Suhrkamp (Theorie). Online verfügbar unter http://www.gbv.de/dms/faz-rez/750212_FAZ_0025_25_0008.pdf.
- Gordis, Leon (2014): Epidemiology. 5. ed. Philadelphia Pa. u.a.: Elsevier Saunders.
- Grimsehl, E.; Schallreuter, W.; Altenburg, K. (1985): Lehrbuch der Physik. Band 1: Mechanik, Akustik,

- Waermelehre. 24. Aufl. Leipzig: Teubner.
- Hacek, Donna M.; Ogle, Anna Marie; Fisher, Adrienne; Robicsek, Ari; Peterson, Lance R. (2010): Significant impact of terminal room cleaning with bleach on reducing nosocomial *Clostridium difficile*. In: *American journal of infection control* 38 (5), S. 350–353. DOI: 10.1016/j.ajic.2009.11.003.
- Hacker, Winfried (1973): Allgemeine Arbeits- und Ingenieurpsychologie. Psychische Struktur und Regulation von Arbeitstätigkeiten. Berlin: Verlag der Wissenschaften.
- Hacker, Winfried (2005): Allgemeine Arbeitspsychologie. Psychische Regulation von Wissens-, Denk- und körperlicher Arbeit. 2., vollst. überarb. und erg. Aufl. Bern: Huber (Schriften zur Arbeitspsychologie, 58).
- Haggett, Peter (1994): Geographical Aspects of the Emergence of Infectious Diseases. In: *Geografiska Annaler. Series B, Human Geography* 76 (2), S. 91–104. DOI: 10.2307/490592.
- Hall, Edward Twitchell; Dixon, Hilde (1976): Die Sprache des Raumes. 1. Aufl. Düsseldorf: Schwann.
- Hamm, Bernd; Neumann, Ingo (1996): Siedlungs-, Umwelt- und Planungssoziologie. Opladen: Leske + Budrich (UTB für Wissenschaft Uni-Taschenbücher, 1884).
- Hans-Knöll-Institut (Hg.) (2017): BI-PROC - Building infection protection classification. Entwicklung eines Klassifikationssystems zur baulichen Infektionsprävention auf Grundlage neuer epidemiologischer Erkenntnisse. Online verfügbar unter www.infectcontrol.de/de/biproc.html, zuletzt geprüft am 12.02.2018.
- Helbing, Dirk (1990): Physikalische Modellierung des dynamischen Verhaltens von Fußgängern (Physical Modeling of the Dynamic Behavior of Pedestrians). Diplomarbeit. Georg-August-Universität, Göttingen. III. Physikalischen Institut.
- Helbing, Dirk (1991): A mathematical model for the behavior of pedestrians. In: *Behavioral Science* 36 (4), S. 298–310. DOI: 10.1002/bs.3830360405.
- Helbing, Dirk (1992): A Fluid Dynamic Model for the Movement of Pedestrians (Complex Systems, 6).
- Helbing, Dirk (1993): Boltzmann-like and Boltzmann-Fokker-Planck equations as a foundation of behavioral models. In: *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 196 (4), S. 546–573. DOI: 10.1016/0378-4371(93)90034-2.
- Helbing, Dirk (1994): A mathematical model for the behavior of individuals in a social field. In: *The Journal of Mathematical Sociology* 19 (3), S. 189–219. DOI: 10.1080/0022250X.1994.9990143.
- Helbing, Dirk (1995): Quantitative Sociodynamics. Stochastic Methods and

- Models of Social Interaction Processes. Dordrecht: Springer Netherlands. Online verfügbar unter <https://ebookcentral.proquest.com/lib/gbv/detail.action?docID=3568705>.
- Helbing, Dirk (1996): Stochastische Methoden, nichtlineare Dynamik und quantitative Modelle sozialer Prozesse. Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 1992. 2., erw. und überarb. Aufl., als Ms. gedr. Aachen: Shaker (Berichte aus der Physik).
- Helbing, Dirk (2013): Verkehrsdynamik. Neue physikalische Modellierungskonzepte. Berlin Heidelberg: Springer.
- Helbing, Dirk; Molnár, Péter (1995): Social force model for pedestrian dynamics. In: *Physical Review E* 51 (5), S. 4282–4286. DOI: 10.1103/PhysRevE.51.4282.
- Heliovaara, Simo; Ehtamo, Harri; Helbing, Dirk; Korhonen, Timo (2013): Patient and impatient pedestrians in a spatial game for egress congestion. In: *Physical review. E, Statistical, nonlinear, and soft matter physics* 87 (1), S. 12802. DOI: 10.1103/PhysRevE.87.012802.
- Herkner, W. H. (1975): Ein erweitertes Modell des Appetenz-Aversions-Konflikts. In: *Z. Klin. Psychol.* (4), S. 50–60.
- Hesse, M. (2016): BPMN Tool Matrix. Online verfügbar unter <https://bpmnmatrix.github.io/>, zuletzt geprüft am 05.09.2017.
- Heymann, David L. (2015): Control of communicable diseases manual. 20th edition. Washington, DC: American Public Health Association.
- Hockberger, Philip E. (2002): A history of ultraviolet photobiology for humans, animals and microorganisms. In: *Photochemistry and Photobiology* 76 (6), S. 561–579. DOI: 10.1562/0031-8655(2002)076<0561:AHOUPE>2.0.CO;2.
- Hof, Herbert; Geginat, Gernot (Hg.) (2000): Mikrobiologie. 158 Tabellen. Stuttgart: Thieme (Duale Reihe).
- Holleman, Arnold F.; Wiberg, Egon; Wiberg, Nils (2007): Lehrbuch der anorganischen Chemie. 102., stark umgearb. u. verb. Aufl. Berlin: de Gruyter. Online verfügbar unter <http://www.reference-global.com/action/show-Book?doi=10.1515/9783110177701>.
- Holzhausen, Jan; Knöfler, Philipp; Riechel, Christoph; Sunder, Wolfgang (2015): Planungssystematik der Leistungsphase Null von Krankenhäusern. In: Carsten Roth, Uwe Dombrowski und M. Norbert Fisch (Hg.): Zukunft. Klinik. Bau. Strategische Planung von Krankenhäusern. Wiesbaden, s.l.: Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 9–164.
- Holzhausen, Jan; Knöfler, Philipp; Riechel, Christoph; Sunder, Wolfgang; Fisch, Norbert; Dombrowski, Uwe;

- Roth, Carsten (2016): Praxis: Krankenhausbau - Forschungsarbeit. Abschlussbericht. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag (Forschungsinitiative Zukunft Bau, F 2929).
- Höser, Christoph (2007): Modellierung raum-zeitlicher Ausbreitungsmuster nosokomialer Infektionen. Masterarbeit, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn.
- Höser, Christoph (2009): GIS als Controlling-Instrument im Krankenhaus. In: 8. Ulmer Symposium "Krankenhausinfektionen Epidemiologie Hygienemaßnahmen Antibiotikatherapie" Programm und Abstracts, (37).
- Höser, Christoph (2017): GIS und Mapping-Tools. In: Jobst Augustin und Daniela Koller (Hg.): Geografie der Gesundheit. Die räumliche Dimension von Epidemiologie und Versorgung. 1. Auflage. Bern: Hogrefe, S. 106–123.
- Hufnagel, L.; Brockmann, D.; Geisel, T. (2004): Forecast and control of epidemics in a globalized world. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 101 (42), S. 15124–15129. DOI: 10.1073/pnas.0308344101.
- Hurrelmann, Klaus (2010): Gesundheitssoziologie. Eine Einführung in sozialwissenschaftliche Theorien von Krankheitsprävention und Gesundheitsförderung. 7. Aufl. Weinheim, München: Juventa Verlag (Grundlagentexte Soziologie).
- IfSG (2000): Infektionsschutzgesetz vom 20. Juli 2000 (BGBl. I S. 1045), das durch Artikel 4 Absatz 20 des Gesetzes vom 18. Juli 2016 (BGBl. I S. 1666) geändert worden ist.
- ISO 9836 (2017): Performance-Normen im Bauwesen - Definition und Berechnung von Flächen- und Raumkennzahlen.
- Janson, Alban; Bürklin, Thorsten; Schwaiger, Elizabeth (2002): Auftritte. Interaktionen mit dem architektonischen Raum: die Campi Venedigs = Scenes. Basel: Birkhäuser.
- Johnson, Steven (2002): Emergence. The connected lives of ants, brains, cities and software. London: Penguin Books.
- Jones, Kate E.; Patel, Nikkita G.; Levy, Marc A.; Storeygard, Adam; Balk, Deborah; Gittleman, John L.; Daszak, Peter (2008): Global trends in emerging infectious diseases. In: *Nature* 451 (7181), S. 990–993. DOI: 10.1038/nature06536.
- Kadanoff, Leo P. (1985): Simulating hydrodynamics. A pedestrian model. In: *Journal of statistical physics* 39 (3-4), S. 267–283. DOI: 10.1007/BF01018663.
- Kaminski, G. (1990): Behavior-Setting Analyse. In: C. F. Graumann und E. D. Lantermann (Hg.): Ökologische Psychologie. Ein Handbuch in Schlüsselbegriffen. München: Psychologie Verl.-Union, S. 154–159.

- Kanizsa, Gaetano (1979): Organization in Vision. Essays on Gestalt Perception: Praeger.
- Kappstein, Ines (2001): Literaturübersicht über die Bedeutung der Luft als Erregerreservoir für postoperative Infektionen im OP-Gebiet. Institut für Medizinische Mikrobiologie, Immunologie und Hygiene, TU München.
- Kayser, Fritz H. (2014): Taschenlehrbuch medizinische Mikrobiologie. Medizinische Mikrobiologie. 13., vollst. überarb. und erw. Aufl. Stuttgart [u.a.]: Thieme.
- Kho, Abel; Johnston, Kelly; Wilson, Jeffrey; Wilson, Stephen J. (2006): Implementing an animated geographic information system to investigate factors associated with nosocomial infections. A novel approach. In: *AJIC: American Journal of Infection Control* 34 (9), S. 578–582. DOI: 10.1016/j.ajic.2006.02.007.
- Kim, Young Chul; Branzell, Arne (1995): Visualising the invisible. Field of perceptual forces around and between objects. Göteborg: Department of Building Design, Chalmers University of Technology [Institutionen för form och teknik, Chalmers tekniska högskola] (Design methods, 95:1).
- King, Lonnie (2008): One Health : A New Professional Imperative. One Health Initiative Task Force : Final Report. World Health through collaboration. Hg. v. American Medical Association.
- Kirsch, Helmut (1964): Leistungsfähigkeit und Dimensionierung von Fussgängerüberwegen. Bonn: Der Bundesminister f. Verkehr, Abt. Strassenbau (Strassenbau und Strassenverkehrstechnik, H. 33).
- Kistemann, Thomas; Claßen, Thomas (2003): Naturschutz und Gesundheitsschutz: Konkurrenz oder Synergie? In: K.-H. Erdmann und C. Schell (Hg.): *Zukunftsfaktor Natur - Blickpunkt Mensch*. Bonn, Bad Godesberg, S. 245–256.
- Kistemann, Thomas; Dangendorf, Friederike; Krizek, Ludmila; Sahl, Hans Georg; Engelhart, Steffen; Exner, Martin (2000): GIS-supported investigation of a nosocomial Salmonella outbreak. In: *International journal of hygiene and environmental health* 203 (2), S. 117–126.
- Kistemann, Thomas; Exner, Martin (2000): Bedrohung durch Infektionskrankheiten? Risikoeinschätzung und Kontrollstrategien. In: *Deutsches Ärzteblatt* 97 (5), A 251–255.
- Kistemann, Thomas; Höser, Christoph; Wienand, Ina (2009): Nutzung Geographischer Informationssysteme für die Krankenhaushygiene. In: *Hygiene + Medizin* 34 (12), S. 482–491.
- Kistemann, Thomas; Leisch, Harald; Schweikart, Jürgen (1997): Geomedizin und Medizinische Geographie. Entwicklung und Perspektiven einer old partnership. In: *Geographische Rundschau* 49 (4), S. 198–203.

- König, Reinhard (2010): Simulation und Visualisierung der Dynamik räumlicher Prozesse. Wechselwirkungen zwischen baulichen Strukturen und sozialräumlicher Organisation städtischer Gesellschaften. Wiesbaden: VS Verl. für Sozialwiss (Computersimulationen in den Sozialwissenschaften).
- KRINKO (2004): Anforderungen an die Hygiene bei der Reinigung und Desinfektion von Flächen. Empfehlung der Kommission für Krankenhaushygiene und Infektionsprävention beim Robert Koch-Institut (RKI). Empfehlung der Kommission für Krankenhaushygiene und Infektionsprävention beim Robert Koch-Institut (KRINKO). In: *Bundesgesundheitsblatt, Gesundheitsforschung, Gesundheitsschutz* 47 (1), S. 51–61. DOI: 10.1007/s00103-003-0752-9.
- KRINKO (2010a): Die Kategorien in der Richtlinie für Krankenhaushygiene und Infektionsprävention - Aktualisierung der Definitionen. Kommission für Krankenhaushygiene und Infektionsprävention. In: *Bundesgesundheitsblatt* (53), S. 754–756. DOI: 10.1007/s00103-010-1106-z.
- KRINKO (2010b): Kommentar der KRINKO zur DIN 1946-4 (2008). Mitteilung der Kommission für Krankenhaushygiene und Infektionsprävention (KRINKO). Hg. v. Robert Koch Institut (Epidemiologisches Bulletin, 4).
- Kruse-Graumann, Lenelis (1974): Räumliche Umwelt. Die Phänomenologie des räumlichen Verhaltens als Beitrag zu einer psychologischen Umwelttheorie. Zugl.: Heidelberg, Univ., Diss., 1973. Berlin: de Gruyter (Phänomenologisch-psychologische Forschungen, 15).
- Kurzai, Oliver; Brakhage, Axel A.; Gastmeier, Petra; Haupt, Katrin; Hein, Frauke; Mettenleiter, Thomas et al. (2016): Strategiebericht. Neue Antiinfektionsstrategien Wissenschaft - Gesellschaft - Wirtschaft. Hg. v. Geschäftsstelle InfectControl 2020. Jena.
- Lang, Alfred (1988): Das Ökosystem Wohnen - Familie und Wohnung. In: Kurt Lüscher, Franz Schultheis und Michael Wehrspaun (Hg.): Die "postmoderne" Familie. Familiäre Strategien und Familienpolitik in einer Übergangszeit. Konstanz: Univ.-Verl. Konstanz (Konstanzer Beiträge zur sozialwissenschaftlichen Forschung, 3).
- Lang, Alfred (1992): On the knowledge of Things and Places. In: Mario von Cranach und Willem Doise (Hg.): Social Representations and the social basis of knowledge. Lewiston, NY, Göttingen: Hogrefe & Huber (Swiss Monographs in psychology, 1).
- Lazer, David; Kennedy, Ryan (2015): What we can learn from the epic failure of google flu trends. Hg. v. wired. Online verfügbar unter <https://www.wired.com/2015/10/>

- can-learn-epic-failure-google-flu-trends/.
- Lazer, David; Pentland, Alex; Adamic, Lada; Aral, Sinan; Barabasi, Albert-Laszlo; Brewer, Devon et al. (2009): Social science. Computational social science. In: *Science (New York, N.Y.)* 323 (5915), S. 721–723. DOI: 10.1126/science.1167742.
- Lemey, Philippe; Rambaut, Andrew; Bedford, Trevor; Faria, Nuno; Bielejec, Filip; Baele, Guy et al. (2014): Unifying viral genetics and human transportation data to predict the global transmission dynamics of human influenza H3N2. In: *PLoS pathogens* 10 (2), e1003932. DOI: 10.1371/journal.ppat.1003932.
- Lewin, Kurt (1936): Principles of topological psychology. New York: McGraw Hill Book (McGraw-Hill series in psychology).
- Lind, James (1768): An essay on diseases incidental to Europeans in hot climates. With the method of preventing their fatal consequences. By James Lind, ... To which is added, An appendix concerning intermittent fevers. London: printed for T. Becket and P. A. de Hondt.
- Longley, Paul A.; Goodchild, Mike; Maguire, David J.; Rhind (2010): Geographic Information Systems and Science, 3rd Edition. 3. uppl: John Wiley & Sons.
- Løvås, Gunnar G. (1994): Modeling and simulation of pedestrian traffic flow. In: *Transportation Research Part B: Methodological* 28 (6), S. 429–443. DOI: 10.1016/0191-2615(94)90013-2.
- Lu, Po-Liang; Siu, L. K.; Chen, Tun-Chieh; Ma, Ling; Chiang, Wen-Gin; Chen, Yen-Hsu et al. (2009): Methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* and *Acinetobacter baumannii* on computer interface surfaces of hospital wards and association with clinical isolates: BioMed Central.
- Lück, Helmut E. (1996): Die Feldtheorie und Kurt Lewin. Eine Einführung. Weinheim: Beltz Psychologie Verlags Union.
- Lynch, Kevin (1960): The image of the city. Cambridge, Mass.: MIT Press (Publication of the Joint Center for Urban Studies).
- Lynch, Kevin (1989): Das Bild der Stadt. 2. Aufl. Braunschweig: Vieweg (Bauwelt-Fundamente, 16).
- Mackintosh, Elizabeth; West, Sheree; Saegert, Susan (1975): Two Studies of Crowding in Urban Public Spaces. In: *Environment and Behavior* 7 (2), S. 159–184. DOI: 10.1177/001391657500700203.
- Mangiapane, S. (2014): Lernen aus regionalen Unterschieden. Online platform: <http://www.versorgungs-atlas.de>. In: *Bundesgesundheitsbl.* 57 (2), S. 215–223. DOI: 10.1007/s00103-013-1889-9.
- Manitz, Juliane; Kneib, Thomas; Schlather, Martin; Helbing, Dirk; Brockmann, Dirk (2014): Origin Detection During Food-borne Disease

- Outbreaks - A Case Study of the 2011 EHEC/HUS Outbreak in Germany. In: *PLoS currents* 6. DOI: 10.1371/currents.outbreaks.f3fdeb08c5b9de7c09ed9cbcef5f01f2.
- Massey, Arthur (1933): Epidemiology in relation to air travel. London: H.K. Lewis & Co. Ltd.
- McLean, Angela R. (Hg.) (2005): SARS. A case study in emerging infections. Royal Society (Great Britain); ebrary, Inc. Oxford: Oxford University Press (Oxford biology).
- Meier, Christiane (2017): Digital Epidemiology. SGPG - Schweizerische Gesellschaft der Fachärztinnen und -ärzte für Prävention- und Gesundheitswesen. Online verfügbar unter http://sgpg.ch/wp-content/uploads/2017/02/Digital-Epidemiology_ChM_21.02.17.pdf, zuletzt geprüft am 29.08.2017.
- Meiss, Pierre von (2014): Elements of architecture. From form to place: Routledge.
- Melin, Thomas; Rautenbach, Robert (2007): Membranverfahren. Grundlagen der Modul- und Anlagenauslegung. 3., aktualisierte und erweiterte Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg (VDI-Buch). Online verfügbar unter <http://site.ebrary.com/lib/alltitles/docDetail.action?docID=10189330>.
- Miller, George A.; Galanter, Eugene; Přibram, Karl H. (1960): Plans and the structure of behavior. New York: Holt (A Holt-Dryden book).
- Miller, N. E. (1944): Experimental studies of conflict. In: J. M. Hunt (Hg.): Personality and the behavior disorders ... Vol. 2. New York, S. 431–465.
- Molnár, Peter (1995): Modellierung und Simulation der Dynamik von Fussgängerströmen. Dissertation. Universität Stuttgart, Stuttgart. II. Institut für Theoretische Physik.
- Morens DM (1998): Acute hemorrhagic conjunctivitis: dealing with a newly emerging disease. Pacific Health Dialog. Hg. v. RESOURCE BOOKS LTD.
- Morris, Charles William (1979): Grundlagen der Zeichentheorie. Ästhetik und Zeichentheorie. Frankfurt/M: Ullstein (Ullstein Buch Ullstein Materialien, 35006).
- Müller, Gabriele (1983): Semiotik der gebauten Umwelt. Über den Zusammenhang von gebauter Umwelt und Verhalten. Trier: Univ. Trier (Trierer Beiträge zur Stadt- & Regionalplanung, 9).
- National Academy of Science (Hg.) (1992): Emerging Infections. Microbial Threats to Health in the United States. Washington DC: National Academy Press.
- Noble, J. V. (1974): Geographic and temporal development of plagues. In: *Nature* 250 (5469), S. 726–729. DOI: 10.1038/250726a0.
- Norman, Donald A. (1988): The psychology of everyday things. New

- York, NY: Basic Books. Online verfügbar unter <http://www.loc.gov/catdir/enhancements/fy0830/87047782-b.html>.
- Norman, Donald A. (1989): Dinge des Alltags. Gutes Design und Psychologie für Gebrauchsgegenstände. Frankfurt/Main: Campus-Verl. Online verfügbar unter http://www.gbv.de/dms/faz-rez/900407_FAZ_0009_9_0002.pdf.
- Norman, Donald A. (1990): The design of everyday things. 1. Doubleday/Currency ed. New York: Doubleday/Currency. Online verfügbar unter <http://www.loc.gov/catdir/description/randdom043/89048989.html>.
- Obenhaus, M.; Richter, Peter G. (1999): Gestaltung von Patientenzimmern in Kliniken. In: *Wissenschaftliche Zeitschrift der TU Dresden* 48 (5/6), S. 73–78.
- Oeding, Detlef (1963): Verkehrsbelastung und Dimensionierung von Gehwegen und anderen Anlagen des Fussgängerverkehrs. Bonn: Bundesminister für Verkehr, Abt. Strassenbau (Strassenbau und Strassenterkehrstechnik, heft 22).
- Older, S. J. (1968): Movement of pedestrians on footways in shopping streets.
- Orians, G. H. (1980): Habitat selection: General theory and applications to human behavior. In: Joan S. Lockard (Hg.): The evolution of human social behavior. New York: Elsevier, S. 49–63.
- Orians, G. H. (1986): An ecological and evolutionary approach to landscape aesthetics. In: Edmund Charles Penning-Roswell und David Lowenthal (Hg.): Landscape meanings and values. London: Unwin Hyman, S. 3–22.
- Orians, Gordon H.; Heerwagen, Judith H. (1992): Evolved responses to landscapes. In: Jerome H. Barkow, Leda Cosmides und John Tooby (Hg.): The Adapted mind. Evolutionary psychology and the generation of culture. New York: Oxford University Press, S. 555–579.
- Pauls, Jake (1984): The movement of people in buildings and design solutions for means of egress. In: *Fire Technology* 20 (1), S. 27–47. DOI: 10.1007/BF02390046.
- Pettinger, K. H.; Wimmer, B.; Wabner, D. (1991): Elimination of atrazine from drinking water by UV-activated hydrogen peroxide. In: *GWF WASSER ABWASSER* 132 (10), S. 553–557.
- Pfeil, B.; Munoz Roldan, M. L.; Pfeil, M. (2007): Krank im Krankenhaus. In: Allianz AG (Hg.): Krank im Krankenhaus, Bd. 38.
- Predtečenskij, Vsevolod M.; Milinski, Anatolij I. (1971): Personenströme in Gebäuden. Berechnungsmethoden für die Projektierung. 1. Aufl. Berlin: Staatsverl. d. DDR.
- Prüss-Üstün, Annette; Corvalán, C. (2006): Preventing disease through healthy environments. Towards an

- estimate of the environmental burden of disease. Geneva: World Health Organization.
- Rapoport, Amos (1975): Toward a Redefinition of Density. In: *Environment and Behavior* 7 (2), S. 133–158. DOI: 10.1177/001391657500700202.
- Rechenberg, Ingo (1973): Evolutionsstrategie. Optimierung technischer Systeme nach Prinzipien der biologischen Evolution. Stuttgart: Frommann-Holzboog (Problemata, 15).
- Reichenbacher, Detlef; Thanheiser, Marc; Krüger, Dominique (2010): Status quo of room decontamination by vaporized hydrogen peroxide. In: *Hygiene + Medizin* 35 (6), S. 204–208.
- Richter, Peter G. (1995): IM AUG DIE AUG oder DIE AUG IM AUG. Eoín pointiertes Hilfsmittel für den heuristisch orientierten partizipativen Prozess der Arbeitsumweltgestaltung. TU Dresden. Dresden.
- Richter, Peter G. (Hg.) (2008): Architekturpsychologie. Eine Einführung. 3. überarb. und erw. Aufl. Lengerich: Pabst Science Publishers. Online verfügbar unter http://sub-hh.ciano.com/book/?bok_id=136004.
- Richter, Peter G.; Schmidt, Peter (1994): Entwicklung in der Arbeit. Ansätze für flexible Tätigkeitsgestaltung durch Arbeitsumweltdesign. In: *Wissenschaftliche Zeitschrift der TU Dresden* 43 (1), S. 35–39.
- Robert Koch Institut (Hg.) (2001-): Richtlinie für Krankenhaushygiene und Infektionsprävention. Empfehlungen des Robert Koch Institutes. Lose Blattsammlung mit Ergänzungen. München.
- Robert Koch-Institut (RKI) (2008): Zur Priorisierung von Infektionskrankheiten im ÖGD (Epidemiologisches Bulletin, 40).
- Robert Koch-Institut (RKI) (2011): Priorisierung übertragbarer Infektionserreger unter dem Aspekt der Surveillance und epidemiologischen Forschung (Epidemiologisches Bulletin, 44).
- Robert-Koch-Institut (2015): Gesundheit in Deutschland. Berlin (Gesundheitsberichterstattung des Bundes - Gemeinsam getragen von RKI und Destatis).
- Roth, Carsten; Dombrowski, Uwe; Fisch, M. Norbert (Hg.) (2015): Zukunft. Klinik. Bau. Strategische Planung von Krankenhäusern. Wiesbaden, s.l.: Springer Fachmedien Wiesbaden. Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-09988-6>.
- Sadalla, Edward K.; Oxley, Diana (1984): The perception of room size. The Rectangularity Illusion. In: *Environment and Behavior* 16 (3), S. 394–405. DOI: 10.1177/0013916584163005.
- Salathé, Marcel (2016): Digital Pharmacovigilance and Disease Surveillance. Combining Traditional and Big-Data Systems for Better Public

- Health. In: *The Journal of infectious diseases* 214 (suppl_4), S399-S403. DOI: 10.1093/infdis/jiw281.
- Savinar, J. (1975): The effect of ceiling height on personal space. In: *Man-Environment Systems* 5, S. 321–324.
- Schäfers, Bernhard (2014): Architektursoziologie. Grundlagen - Epochen - Themen. 3., aktualisierte und erw. Aufl. Wiesbaden: Springer VS Verl. für Sozialwissenschaften (Lehrbuch, / Bernhard Schäfers) ; [Bd. 1]].
- Scharlach, Holger; Crom, Wolfgang (2013): Entwicklung und Einsatzgebiete thematischer Karten im frühen 19. Jahrhundert am Beispiel der Cholera. In: *Kartographische Nachrichten*.
- Scheflen, Albert E.; Ashcraft, Norman (1976): Human territories. How we behave in space-time. Englewood Cliffs/N.J.: Prentice-Hall.
- Schenk, Martin (1998): Optimierungsprinzipien der menschlichen Fortbewegung. Anthropologische Grundlagen der Fortbewegung unter besonderer Berücksichtigung des Gehens ; praktische Untersuchungen zum Fußgängerverhalten in Siedlungsgebieten. @Stuttgart, Univ., Diss.,
- Scherrer, Martin; Brandt, Christian; Chaberny, Iris F.; Dettenkofer, Markus; Engelhart, Steffen; Hauer, Thomas et al. (2009): Recommendations on the design, operation and inspection of HVAC systems in operating rooms issued by the german network future hygiene. In: *Hygiene + Medizin* 34 (5), S. 188–191.
- SchHaltHygV (2017): Schweinehaltungshygieneverordnung in der Fassung der Bekanntmachung vom 2. April 2014 (BGBl. I S. 326), die zuletzt durch Artikel 134 des Gesetzes vom 29. März 2017 (BGBl. I S. 626) geändert worden ist).
- Schopler, John; Stockdale, Janet E. (1977): An interference analysis of crowding. In: *Environmental Psychology and Nonverbal Behavior* 1 (2), S. 81–88. DOI: 10.1007/BF01145457.
- Schott, Thomas; Hornberg, Claudia (Hg.) (2011): Die Gesellschaft und ihre Gesundheit. 20 Jahre Public Health in Deutschland ; Bilanz und Ausblick einer Wissenschaft. 1. Aufl. Wiesbaden: VS Verl. für Sozialwiss (Gesundheit und Gesellschaft).
- Schubert, Hellmut (1967): Planungsmaßnahmen für den Fußgängerverkehr in den Städten. Bonn: Bundesminister für Verkehr, Abt. Straßenbau (Strassenbau und Strassenverkehrstechnik, 56).
- Schultz-Gambard, Jürgen (1990): Dichte und Enge. In: C. F. Graumann und E. D. Lantermann (Hg.): *Ökologische Psychologie. Ein Handbuch in Schlüsselbegriffen*. München: Psychologie Verl.-Union.
- Schultz-Gambard, Jürgen (2010): Dichte und Crowding. In: Volker Linneweber und Niels Birbaumer (Hg.): *Spezifische Umwelten und*

- umweltbezogenes Handeln. Göttingen: Hogrefe (Enzyklopädie der Psychologie Theorie und Forschung Umweltpsychologie, ; Bd. 2), S. 97–129.
- Schultz-Gambard, Jürgen; Hommel, B. (1987): Sozialpsychologie und Umweltgestaltung: der Beitrag der Crowdingforschung. In: Jürgen Schultz-Gambard (Hg.): Angewandte Sozialpsychologie. Konzepte, Ergebnisse, Perspektiven. München: Psychologie-Verl.-Union.
- Schwefel, Hans-Paul (1977): Numerische Optimierung von Computer-Modellen mittels der Evolutionsstrategie. Mit einer vergleichenden Einführung in die Hill-Climbing- und Zufallsstrategie. 1. Aufl. Basel: Birkhäuser (Interdisciplinary systems research, 26).
- Schweikart, Jürgen; Kistemann, Thomas (2013): Kartographie der Gesundheit. Mapping Health and Health Care. In: *Kartographische Nachrichten : KN ; Organ der Deutschen Gesellschaft für Kartographie e.V., der Schweizerischen Gesellschaft für Kartographie und der österreichischen Kartographischen Kommission in der österreichischen Geographischen Gesellschaft* 63 (1), S. 3.
- Schweikart, Jürgen; Kistemann, Thomas (2017): Erkenntnisgewinn einer räumlichen Betrachtung von Gesundheit. In: Jobst Augustin und Daniela Koller (Hg.): *Geografie der Gesundheit. Die räumliche Dimension von Epidemiologie und Versorgung*. 1. Auflage. Bern: Hogrefe, S. 15–29.
- Simmel, Georg (2006): Der Raum und die räumlichen Ordnungen der Gesellschaft. In: Monika Eig Müller und Georg Vobruba (Hg.): *Grenzsoziologie. Die politische Strukturierung des Raumes*. 1. Aufl. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften / GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden, S. 15–23.
- Sitte, Camillo (1889): Der Städtebau nach seinen künstlerischen Grundsätzen. Ein Beitrag zur Lösung modernster Fragen der Architektur und monumentalen Plastik unter besonderer Beziehung auf Wien. 2. Aufl. Wien: Graeser.
- Slonczewski, Joan L.; Foster, John W. (2012): Mikrobiologie. Eine Wissenschaft mit Zukunft. Unter Mitarbeit von Jessica Hilbig, Birgit Jarosch, Lothar Seidler und Olaf Werner. 2. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum. Online verfügbar unter <http://microbiology2.com>.
- Smith, K. R.; Corvalan, C. F.; Kjellstrom, T. (1999): How much global ill health is attributable to environmental factors? In: *Epidemiology (Cambridge, Mass.)* 10 (5), S. 573–584.
- Snow, John (1855): On the mode of communication of cholera, by John Snow, ... 2d edition, much enlarged. London: J. Churchill.
- Stanley, H. Eugene; Ostrowsky, Nicole (Hg.) (1985): On Growth and Form.

- Fractal and Non-Fractal Patterns in Physics. Dordrecht: Springer (NATO ASI Series, Series E, 100). Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-94-009-5165-5>.
- Stiller, Andrea; Schroder, Christin; Gropmann, Alexander; Schwab, Frank; Behnke, Michael; Geffers, Christine et al. (2016): Ausstattung mit Händedesinfektionsmittelspendern und Einbettzimmern in Hinblick auf die Infektionsprävention - eine Bestandsaufnahme in Krankenhäusern in Deutschland. In: *Bundesgesundheitsblatt, Gesundheitsforschung, Gesundheitsschutz*. DOI: 10.1007/s00103-016-2384-x.
- Stocker, Thomas (2014): Climate change 2013. The physical science basis : Working Group I contribution to the Fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. New York: Cambridge University Press.
- Stokols, Daniel (1976): The experience of crowding in primary and secondary environments. In: *Environment and Behavior* 8 (1), S. 49–86. DOI: 10.1177/001391657600800104.
- Sunder, Wolfgang; Holzhausen, Jan; Gastmeier, Petra; Haselbeck, Andrea; Dreßler, Inka (2018): Bauliche Hygiene im Klinikbau. Planungsempfehlungen für die bauliche Infektionsprävention in den Bereichen der Operation, Notfall- und Intensivmedizin. Bonn (Zukunft Bauen - Forschung für die Praxis, 13).
- Sundstrom, Eric (1975): An experimental study of crowding. Effects of room size, intrusion, and goal blocking on nonverbal behavior, self-disclosure, and self-reported stress. In: *Journal of Personality and Social Psychology* 32 (4), S. 645–654. DOI: 10.1037//0022-3514.32.4.645.
- Tegnell, A.; van Loock, F.; Baka, A.; Wallyn, S.; Hendriks, J.; Werner, A.; Gouvras, G. (2006): Development of a matrix to evaluate the threat of biological agents used for bioterrorism. In: *Cellular and molecular life sciences : CMLS* 63 (19-20), S. 2223–2228. DOI: 10.1007/s00018-006-6310-5.
- Thaler, Richard H.; Sunstein, Cass R. (2009): Nudge. Wie man kluge Entscheidungen anstößt. 3. Aufl. Berlin: Econ.
- Tian, Huaiyu; Xu, Bing (2015): Persistence and transmission of avian influenza A (H5N1). Virus movement, risk factors and pandemic potential. In: *Annals of GIS* 21 (1), S. 55–68. DOI: 10.1080/19475683.2014.992368.
- Timmermans, Harry; van der Hagen, Xavier; Borgers, Aloys (1992): Transportation systems, retail environments and pedestrian trip chaining behaviour. Modelling issues and applications. In: *Transportation Research Part B: Methodological* 26 (1), S. 45–59. DOI: 10.1016/0191-2615(92)90019-S.

- Tolman, E. C. (1948): Cognitive maps in rats and men. In: *Psychological Review* 55 (4), S. 189–208.
- TRBA-500 (2012): Grundlegende Maßnahmen bei Tätigkeiten mit biologischen Arbeitsstoffen. Technische Regeln für Biologische Arbeitsstoffe. Hg. v. Ausschuss für Biologische Arbeitsstoffe (ABAS). Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin.
- Ulich, Eberhard (2005): Arbeitspsychologie. 6., überarb. und erw. Aufl. Zürich: vdf Hochschulverl. an der ETH [u.a.]. Online verfügbar unter http://deposit.ddb.de/cgi-bin/dokserv?id=2646503&prov=M&dok_vor=1&dok_ext=htm.
- Ulrich, R. (1984): View through a window may influence recovery from surgery. In: *Science (New York, N.Y.)* 224 (4647), S. 420–421. DOI: 10.1126/science.6143402.
- Ulrich, Roger S. (1977): Visual landscape preference: A model and application. In: *Man-Environment Systems* (Vol 7 (5)), S. 279–293.
- Ulrich, Roger S. (1983): Aesthetic and affective response to natural environments. In: Irwin Altman und Joachim F. Wohlwill (Hg.): *Behavior and the natural environment*. New York, NY: Plenum Press (Human behavior and environment, 6), S. 85–125.
- Ulrich, Roger S.; Zimring, Craig; Zhu, Xuemei; DuBose, Jennifer; Seo, Hyun-Bo; Choi, Young-Seon et al. (2008): A review of the research literature on evidence-based healthcare design. In: *HERD* 1 (3), S. 61–125.
- van den Broeck, Wouter; Gioannini, Corrado; Gonçalves, Bruno; Quagiotto, Marco; Colizza, Vittoria; Vespignani, Alessandro (2011): The GLEaMviz computational tool, a publicly available software to explore realistic epidemic spreading scenarios at the global scale. In: *BMC infectious diseases* 11, S. 37. DOI: 10.1186/1471-2334-11-37.
- van der Bij, Akke K.; Pitout, Johann D. D. (2012): The role of international travel in the worldwide spread of multiresistant Enterobacteriaceae. In: *The Journal of antimicrobial chemotherapy* 67 (9), S. 2090–2100. DOI: 10.1093/jac/dks214.
- van Limburg, Maarten; van Gemert-Pijnen, Julia E. W. C.; Nijland, Nicol; Ossebaard, Hans C.; Hendrix, Ron M. G.; Seydel, Erwin R. (2011): Why business modeling is crucial in the development of eHealth technologies. In: *Journal of medical Internet research* 13 (4), e124. DOI: 10.2196/jmir.1674.
- Vandini, Alberta; Temmerman, Robin; Frabetti, Alessia; Caselli, Elisabetta; Antonioli, Paola; Balboni, Pier Giorgio et al. (2014): Hard surface biocontrol in hospitals using microbial-based cleaning products. In: *PloS one* 9 (9), e108598. DOI: 10.1371/journal.pone.0108598.

- VDI (2004): Filternde Abscheider, Tiefenfilter aus Fasern. VDI-Richtlinien ; VDI 3677 ; Blatt 2. Berlin: Beuth.
- VDI 2083 (2010): Richtlinienreihe VDI 2083 "Reinraumtechnik". Hg. v. VDI-Fachbereich Technische Gebäudeausrüstung.
- Verhasselt, Y. (1993): Geography of health. Some trends and perspectives. In: *Social Science and Medicine* 36 (2), S. 119–123.
- Völker, Sebastian (2016): Anthropologische Aspekte des Verhältnisses von Mensch und Natur(-landschaft). In: Ulrich Gebhard und Thomas Kistemann (Hg.): *Landschaft, Identität und Gesundheit. Zum Konzept der Therapeutischen Landschaften*. Wiesbaden: Springer VS, S. 109–122.
- Volpert, W. (1994): Arbeitsinformatik und Gestaltungswissenschaft als neue Gebiete der interdisziplinären Arbeitswissenschaft. In: Bärbel Bergmann und Peter Richter (Hg.): *Die Handlungsregulationstheorie. Von der Praxis einer Theorie*. Göttingen, Seattle: Hogrefe.
- Walch, Jeffrey M.; Rabin, Bruce S.; Day, Richard; Williams, Jessica N.; Choi, Krissy; Kang, James D. (2005): The Effect of Sunlight on Postoperative Analgesic Medication Use. A Prospective Study of Patients Undergoing Spinal Surgery. In: *Psychosomatic Medicine* 67 (1), S. 156–163. DOI: 10.1097/01.psy.0000149258.42508.70.
- Watson, John B. (1913): *Psychology as the behaviorist views it*. [Indianapolis]: [Bobbs-Merrill] (Bobbs-Merrill reprint series in the social sciences).
- Weber, Max; Winckelmann, Johannes (1976): *Wirtschaft und Gesellschaft. Grundriss der verstehenden Soziologie*. 5. rev. Aufl. Tübingen: J. C. B. Mohr.
- Weidmann, Ulrich (1993): *Transporttechnik der Fussgänger. Transporttechnische Eigenschaften des Fussgängerverkehrs* ; (Literaturauswertung). 2., erg. Aufl. Zürich: IVT (Schriftenreihe des IVT, Nr. 90).
- Weiser, Armin A.; Gross, Stefan; Schielke, Anika; Wigger, Jan-Frederik; Ernert, Andrea; Adolphs, Julian et al. (2013): Trace-back and trace-forward tools developed ad hoc and used during the STEC O104:H4 outbreak 2011 in Germany and generic concepts for future outbreak situations. In: *Foodborne pathogens and disease* 10 (3), S. 263–269. DOI: 10.1089/fpd.2012.1296.
- Weiser, Armin A.; Thöns, Christian; Filter, Matthias; Falenski, Alexander; Appel, Bernd; Käsbohrer, Annemarie (2016): FoodChain-Lab: A Trace-Back and Trace-Forward Tool Developed and Applied during Food-Borne Disease Outbreak Investigations in Germany and Europe. In: *PloS one* 11 (3), S. e0151977. DOI: 10.1371/journal.pone.0151977.
- Wener, Richard E.; Kaminoff, Robert D. (1983): *Improving environmental*

- information. Effects of Signs on Perceived Crowding and Behavior. In: *Environment and Behavior* 15 (1), S. 3–20. DOI: 10.1177/0013916583151001.
- Weresch, Katharina (2005): Wohnungsbau im Wandel der Wohnzivilisierung und Genderverhältnisse. 1. Auflage. Hamburg: Dölling und Galitz Verlag.
- Westheide, Wilfried; Rieger, Reinhard (Hg.) (2007): Einzeller und wirbellose Tiere. Unter Mitarbeit von Gerd Alberti. 2. Auflage. München: Elsevier Spektrum Akademischer Verlag (Spezielle Zoologie, / begr. von Wilfried Westheide und Reinhard Rieger ; Teil 1).
- WHO (1997): Health and environment in sustainable development. Five years after the earth summit. Document WHO/EHG/97.8. Geneva.
- WHO (2008): International Health Regulations (2005). Online-Ausg. Geneva: WHO.
- WHO (2015): World Health Statistics 2015. Geneva: World Health Organization.
- Wicker, A. W. (1973): Undermanning theory and research: Implications for the study of psychological and behavioral effects of excess human populations. In: *Representative Research in Social Psychology* 4 (1), S. 185–206.
- Wieler, Lothar H. (2014): "One Health"-linking human, animal and environmental health. In: *International journal of medical microbiology : IJMM* 304 (7), S. 775–776. DOI: 10.1016/j.ijmm.2014.08.014.
- Wiener, Norbert (1958): Mensch und Menschmaschine. Kybernetik und Gesellschaft. 1. Auflage. Frankfurt am Main: Metzner.
- Wiener, Norbert (1963): Kybernetik. Regelung und Nachrichtenübertragung im Lebewesen und in der Maschine. Düsseldorf: Econ-Verlag.
- Woolley-Meza, Olivia; Thiemann, Christian; Grady, Daniel; Lee, Jiyeon; Seebens, Hanno; Blasius, Bernd; Brockmann, Dirk (2011): Complexity in human transportation networks. A comparative analysis of worldwide air transportation and global cargo-ship movements. In: *The European physical journal / B* 84 (4), S. 589–600.
- Worchel, S.; Teddlie, C. (1976): The experience of crowding. A two-factor theory. In: *Journal of Personality and Social Psychology* 34 (1), S. 30–40.
- Wu, Xiaoxu; Lu, Yongmei; Zhou, Sen; Chen, Lifan; Xu, Bing (2016): Impact of climate change on human infectious diseases: Empirical evidence and human adaptation. In: *Environment International* 86, S. 14–23. DOI: 10.1016/j.envint.2015.09.007.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1, Slonczewski, Joan L.; Foster, John W., Mikrobiologie. Eine Wissenschaft mit Zukunft, veröffentlicht 2012, mit freundlicher Nutzungsgenehmigung der SNCSC, Springer Nature Customer Service Center GmbH.

Alle weiteren Abbildungen eigene Darstellungen.

Abbildung 1: Auszug Stadtplan London: Cholerabedingte Todesfälle in Zentral-London September 1854 (Slonczewski und Foster 2012)	11
Abbildung 2: Der epidemiologische Dreiklang einer Infektionskrankheit (in Anlehnung an Gordis 2014)	13
Abbildung 3: Eintrittspforten mikrobieller Erreger beim Menschen in (Anlehnung an Mims et al. 2001)	14
Abbildung 4: Diagramm der Auswertung der Infektionsübertragungswege	26
Abbildung 5: Herleitung der infektionspräventiven Baukomponenten nach priorisierten Erregerarten und Übertragungsweg	29
Abbildung 6: Entflechtete Wegeüberlagerung in Operationssälen (in Anlehnung an Sunder et al. 2018)	43
Abbildung 7: Materialfluss einer Küche mit gerichteten Ver- und Entsorgungsketten (in Anlehnung an ARGEBAU 2002)	43
Abbildung 8: Zuweisung von Flächen nach Grün-Gelb-Rot-Bereichen	45
Abbildung 9: VRR-Einheit; Vergleichs-Veränderungs-Rückkopplungs-Einheit nach (Hacker 1973); Darstellung in Anlehnung an (Richter 2008)	73
Abbildung 10: Die sieben Stadien des Handelns nach (Norman 1989); Darstellung in Anlehnung an (Richter 2008)	73
Abbildung 11: Die Wege (in Anlehnung an Lynch 1989)	76
Abbildung 12: Grenzlinien / Ränder (in Anlehnung an Lynch 1989)	76
Abbildung 13: Die Bereiche (in Anlehnung an Lynch 1989)	77
Abbildung 14: Die Brennpunkte (in Anlehnung an Lynch 1989)	77
Abbildung 15: Die Merk- oder Wahrzeichen (in Anlehnung an Lynch 1989)	77
Abbildung 16: Klarheit der Form (in Anlehnung an Lynch 1989)	78
Abbildung 17: Einmaligkeit (in Anlehnung an Lynch 1989)	78
Abbildung 18: Kontinuität (in Anlehnung an Lynch 1989)	79
Abbildung 19: Dominanz (in Anlehnung an Lynch 1989)	79
Abbildung 20: Klarheit der Verbindungsglieder (in Anlehnung an Lynch 1989)	79

Abbildung 21: Richtungs differenzierung (in Anlehnung an Lynch 1989).....	79
Abbildung 22: Umfang des Sichtbaren (in Anlehnung an Lynch 1989).....	80
Abbildung 23: Bewegungsbewusstsein (in Anlehnung an Lynch 1989).....	80
Abbildung 24: Zeitliche Reihenfolge.....	80
Abbildung 25: Namen und Bedeutungen.....	81
Abbildung 26: Dreieck von Gaetano Kanizsa.....	86
Abbildung 27: Das Tanzflächenphänomen (in Anlehnung an Helbing 1992).....	90
Abbildung 28: Übertrag eines Gebäudegrundrisses in eine netzwerk-graphenbasierte Darstellung (in Anlehnung an Hillier und Hanson 1984).....	91
Abbildung 29: Ausbildung von Bahnen bei entgegengesetzten Laufrichtungen (in Anlehnung an Molnár 1995; Helbing und Molnar 1997)	93
Abbildung 30: Oszillieren der Durchgangsrichtung (in Anlehnung an Molnár 1995; Helbing und Molnar 1997)	93
Abbildung 31: Dynamik an Wege-Kreuzungen (in Anlehnung an Molnár 1995; Helbing und Molnar 1997).....	94
Abbildung 32: Separation in Bahnen (in Anlehnung an Helbing 2013)	95
Abbildung 33: Spurverengung durch Trichterform (in Anlehnung an Helbing 2013).....	95
Abbildung 34: Bildung eines Kreisverkehrs (in Anlehnung an Helbing 2013).....	95
Abbildung 35: Selbstorganisierte Aufteilung von Durchgängen / Türen (in Anlehnung an Helbing 2013).....	96
Abbildung 36: Vereinfachte schematische Darstellung: Regelmäßige Ausbreitungswellen mit konstanter Frontgeschwindigkeit wie z. B. bei der Pestepidemie 14. Jahrhundert (in Anlehnung an Brockmann 2017)	104
Abbildung 37: Vereinfachte schematische Darstellung: Skalenfreie Dispersion, über lange Distanzen springende Erreger, Sekundärausbrüche (in Anlehnung an Brockmann 2017).....	104
Abbildung 38: Objekt-Layer eines Geographischen Informationssystems (GIS) für Krankenhäuser (in Anlehnung an Kistemann et al. 2009).....	113
Abbildung 39: Bewegungsprofil eines infektiösen Patienten (Patient 1) und entstehende Kotaminationslandschaft (in Anlehnung an Kistemann et al. 2009).....	117
Abbildung 40: Bewegungsprofil eines potentiellen Rezipienten (Patient 2) durch die Kontaminationslandschaft (in Anlehnung an Kistemann et al. 2009)	118
Abbildung 41: Einbettung des Hygienethemas und seiner Experten bereits in der initialen Projektphase (Holzhausen et al. 2015).....	137
Abbildung 42: idealisierte Projektorganisation der Planungssystematik (in Anlehnung an Holzhausen et al. 2015)	138

Tabellenverzeichnis

Alle Tabellen eigene Darstellungen

Tabelle 1: Liste der Erreger der Prioritätsgruppe 1 nach (Robert Koch-Institut (RKI) 2011) erweitert um ihre Übertragungswege	22
Tabelle 2: Liste der Erreger der Prioritätsgruppe 2 nach (Robert Koch-Institut (RKI) 2011) erweitert um ihre Übertragungswege	23
Tabelle 3: Liste der Erreger der Prioritätsgruppe 3 nach (Robert Koch-Institut (RKI) 2011) erweitert um ihre Übertragungswege	24
Tabelle 4: Liste der Erreger der Prioritätsgruppe 4 nach (Robert Koch-Institut (RKI) 2011) erweitert um ihre Übertragungswege	25
Tabelle 5: Auswertung Infektionsübertragungswege	25
Tabelle 6: Zusammenspiel Infektionskette und Baukomponenten.....	27

